



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VODÍKOVÁ ENERGETIKA

HYDROGEN FOR POWER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Kocman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Lukáš Kocman**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vodíková energetika

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využívání vodíku je jedním z nejnovějších trendů v energetice a dopravě. Existuje celá řada oblastí, kde může využití vodíku výrazně přispět ke snížení environmentální zátěže činností člověka. Využití vodíku se předpokládá v automobilové i železniční přepravě. Další velkou oblastí využívání vodíku je elektroenergetika. O vodíku se také často hovoří jako o vhodném doplňku obnovitelných zdrojů energie, a to jako řešení problémů s uskladněním energie. Tyto procesy se nazývají power-to-gas nebo power-to-hydrogen.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat rešerši technologií získání vodíku.
Zpracovat rešerši technologií využití vodíku v energetice.
Zpracovat rešerši přínosu vodíku k akumulaci energie.

Seznam doporučené literatury:

SLAVÍK, Jakub. Smart city v praxi: jak pomocí moderních technologií vytvářet město příjemné k životu a přátelské k podnikání. Praha: Profi Press, 2017. ISBN 978-80-86726-80-9.

BALAJKA, Jiří. Vodík a jiné nové nosiče energie. Bratislava: Alfa, 1982. Edícia energetickej literatúry.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Čím dál tím větší uplatnění vodíku v moderní energetice, se stalo motivem pro napsání této práce. Práce je zaměřena na vodíkovou energetiku a jejím cílem bylo zpracovat rešerši technologií získávání vodíku, využití vodíkových technologií v současné energetice a přínosu vodíku k akumulaci energie. Tato práce, kromě popisu současných vodíkových technologií, také obsahuje příklady zařízení a projektů využívající vodík, se kterými se můžeme v dnešní době setkat. Rešerše výše zmíněných technologií ukázala, že přes některé své nedostatky, má vodík v dnešní energetice značné uplatnění, které v následujících letech podle očekávání poroste.

Klíčová slova

Vodík, palivový článek, akumulace energie, Power to Gas

ABSTRACT

The increasing use of hydrogen in modern energy, has become the motive for writing this work. The work is focused on hydrogen energy and its aim was to compile an overview of hydrogen production technologies, the use of hydrogen technologies in current energetics and the use of hydrogen to energy accumulation. In addition to describing current hydrogen technologies, this work also includes examples of hydrogen devices and projects that we may encounter today. An overview of the above-mentioned technologies has shown that, despite some of its shortcomings, hydrogen has a significant application in current energetics, that is expected to increase in the coming years.

Key words

Hydrogen, fuel cell, energy accumulation, Power to Gas

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOCMAN, Lukáš. *Vodíková energetika*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124242>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. 52 s. Vedoucí práce Zdeněk Skála.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vodíková energetika** vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Skály, CSc. s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který se nachází na konci této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Zdeňku Skálovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

ÚVOD	11
1 Vodík a jeho výroba.....	12
1.1 Výroba vodíku z fosilních paliv	13
1.1.1 Parní reforming zemního plynu	13
1.1.2 Parciální oxidace ropných frakcí	14
1.1.3 Zplyňování uhlí	15
1.2 Výroba vodíku štěpením vody	16
1.2.1 Elektrolýza vody.....	16
1.2.2 Vysokoteplotní elektrolýza	17
1.2.3 Fotoelektrolýza	17
1.2.4 Termochemické štěpení vody.....	18
1.3 Výroba vodíku z biomasy	19
1.3.1 Parní reforming biomasy	19
1.3.2 Vodík z derivátů biomasy.....	19
1.3.3 Zplyňování biomasy	20
1.3.4 Přímá biofotolýza.....	20
1.3.5 Nepřímá biofotolýza	21
1.3.6 Fotofermentace.....	21
1.3.7 Tmavá fermentace.....	22
1.4 Ekonomické shrnutí vybraných metod	22
2 Palivové články	23
2.1 Palivový článek	23
2.2 Typy palivových článků	24
2.2.1 Palivový článek s polymerní membránou (PEMFC).....	24
2.2.2 Alkalický palivový článek (AFC)	25
2.2.3 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)	26
2.2.4 Palivový článek s tekutým uhličitánem (MCFC)	27
2.2.5 Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC).....	28
2.2.6 Palivový článek pro přímou reakci metanolu (DMFC).....	29
3 Palivočlánková mobilita.....	31
3.1 Palivočlánkové automobily	31
3.2 Příklady palivočlánkových automobilů	32
3.2.1 Toyota Mirai	32
3.2.2 Hyundai ix35 Fuel Cell.....	33
3.2.3 Renault Kangoo ZE-H2	33

3.3	Palivočláňkové autobusy	34
3.4	Palivočláňkový vlak Coradia iLint	35
4	Stacionární palivočláňkové zdroje	36
4.1	Palivočláňkové mikrokogenerační jednotky	37
4.2	Palivočláňkové záložní zdroje energie	39
5	Využití vodíku pro akumulaci energie	40
5.1	Power to Gas	40
5.2	Příklady projektů Power To Gas	42
5.2.1	ÚJV Řež – Projekt ukládání přebytků energie	42
5.2.2	Energiepark Mainz	43
5.2.3	Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R)	44
	ZÁVĚR	45
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	50
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK	52

ÚVOD

O vodíku se po dlouhou dobu mluvilo jako o palivu budoucnosti, které jednoho dne nahradí fosilní paliva, jako je ropa nebo uhlí. Vodík oproti ostatním palivům poskytuje velkou řadu výhod, je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru a jeho používání je ekologicky nezávadné. Při současné snaze o docílení uhlíkové neutrality je jisté, že právě vodík bude hrát v následujících letech velkou roli ve světové energetice. Snad díky tomu v dnešní době, již vodík pomalu přestává být palivem budoucnosti a začíná být palivem přítomnosti.

Vodík si v pozvolna prorazil cestu v oblasti mobility, kde slouží jako palivo pro palivočlánkové vozidla. Automobily poháněné palivovými články dosahují srovnatelného dojezdu jako automobily poháněné konvenčními palivy a jejich používání je ekologicky šetrné jako u klasických elektromobilů. Palivočlánkové automobily již začínají být běžně dostupné veřejnosti a palivočlánkové vlaky a autobusy pomalu nacházejí své uplatnění ve veřejné dopravě.

Kromě dopravy jsou palivové články využívány i jako ekologické zdroje energie pro elektrárny, které rovněž nabízejí konstantní výkon. Jelikož při výrobě elektřiny vzniká v palivovém článku velké množství tepla, slouží často ty to elektrárny k společné výrobě elektřiny a tepla tzv. kogenerace. Kogenerace se jeví výhodná i pro malé budovy a z toho důvodu jsou palivové články používány jako tzv. mikrokogenerační jednotky sloužící k pokrytí energetických požadavků a zateplení domácností.

Své největší úskalí vodík nalézá ve výrobě. Přestože je vodík obnovitelný zdroj, který lze získávat z vody za pomoci elektrické energie, je v současnosti převážně produkován z fosilních paliv. Řešením tohoto problému by mohla představovat technologie Power to Gas a její využití pro akumulaci energie z velmi kolísavých obnovitelných zdrojů.

Tato práce je zaměřená na vodíkovou energetiku a v její první části jsou popsány vybrané metody výroby vodíku z fosilních paliv a obnovitelných zdrojů. Další část práce se zabývá palivovými články a jejich využití v oblasti mobility a stacionárních zdrojů energie. Práce je také doplněna o, konkrétní příklady a ukazuje kde všude se můžeme s palivočlánkovými technologiemi v energetice setkat. V poslední části práce je popsáno využití vodíku k akumulaci energie pomocí technologie Power to Gas a jsou zde ukázané projekty využívající tuhle technologii.

1 VODÍK A JEHO VÝROBA

Vodík (H) je v mnoha ohledech velmi zajímavý prvek. Je tvořen jedním protonem a jedním elektronem a jedná o nejjednodušší a také nejlehčí a nejrozšířenější prvek ve vesmíru. V téhle práci nás ale bude zajímat využití vodíku jako paliva. V mnoha ohledech jako jednoho z nejdokonalejších paliv. Proč je ale vodík tak dobré palivo? Ze všech paliv má právě vodík nejvyšší spalnou energii na jednotku hmoty a díky tomu je při stejné hmotnosti účinnější než ostatní paliva. Vodík také snadno reaguje s kyslíkem a při reakci uvolňuje značné množství tepla. Jelikož při jeho spalování nevznikají žádné škodlivé produkty, je využívání vodíku jako paliva velmi šetrné k životnímu prostředí. Vodík je možné získávat z vody pomocí elektrické energie. Jelikož je povrch země přibližně ze 70 % tvořen vodou, jedná se o obnovitelný zdroj energie [44].

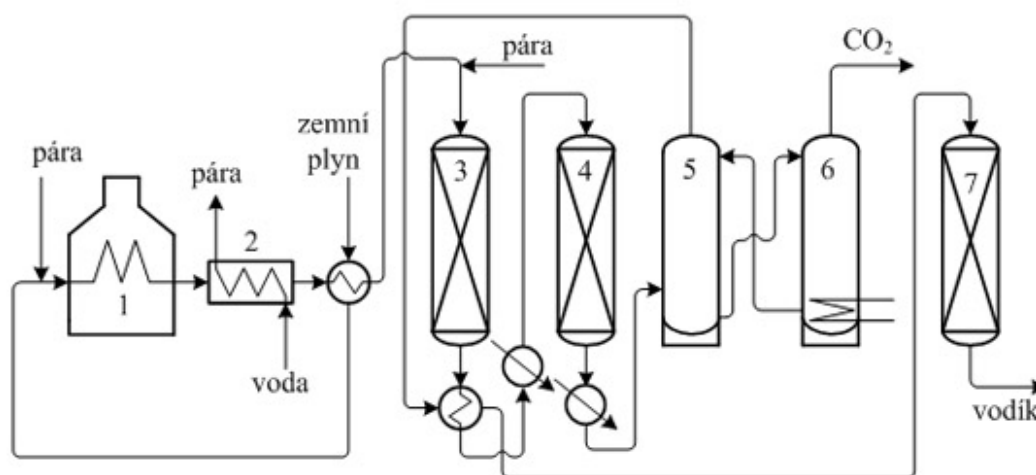
Přesto že se vodík může zdát jako dokonale čistý a obnovitelný zdroj energie, je potřeba brát ohled na způsob jeho výroby. V současnosti je vodík vyráběn převážně z fosilních paliv jako je ropa, uhlí a zemní plyn. O vodíku jako o obnovitelném zdroji bychom tedy měli mluvit pouze tehdy, pokud bude vyráběn z obnovitelných zdrojů např. z biomasy nebo pomocí štěpením vody na vodík a kyslík. V případě metod štěpení vody jako je tomu např. u klasické elektrolýzy vody, bychom také měli brát ohled na to, nakolik je použitá energie pro tento proces vyráběna z obnovitelných zdrojů.

V další části této kapitoly jsou popsány jednotlivé metody výroby vodíku. Jelikož ale v dnešní době existuje velmi velké množství metod získávání vodíku, byli uvedeny pouze metody z mého pohledu nejdůležitější.

1.1 Výroba vodíku z fosilních paliv

1.1.1 Parní reforming zemního plynu

V současnosti se jedná o nejrozšířenější a nejlevnější technologii výroby vodíku, její účinnost se pohybuje okolo 80 %. Hlavní nevýhodou této metody je vysoká produkce CO₂. Poměr vyprodukovaného vodíku ku CO₂ je přibližně 1:7 [1]



Obr. 1.1 Schéma parního reformování zemního plynu [2]

(1 – pec, 2 – kotel na výrobu páry, 3 – vysokoteplotní konvertor CO, 4 – nízkoteplotní konvertor CO, 5 – absorber CO₂, 6 – desorbér CO₂, 7 – metanizér) [2]

Parní reforming se provádí v peci při teplotě 750 – 800 °C a tlaku 3 – 5 MPa, za přítomnosti katalyzátoru na bázi oxidu nikelnatého [2]. Metan (hlavní složka zemního plynu) se přivádí do vodní páry a vzniklá směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku, oxidu uhelnatého a malého množství CO₂ [1].



Následně, pro navýšení množství vodíku a eliminování oxidu uhelnatého, vedeme reakční produkty přes kotel na výrobu páry a výměník, kde se ochladí na teploty cca 360°C, do konvertorů, kde za přivedení další vodní páry se oxid uhelnatý přemění na CO₂ [1,2].



Protože vodík používaný pro hydrogenaci nesmí obsahovat kyslíkaté sloučeniny, převádí se zbytky CO a CO₂ zpět na metan. K tomu to procesu dochází v metanizačním reaktoru při teplotě okolo 400°C [2]



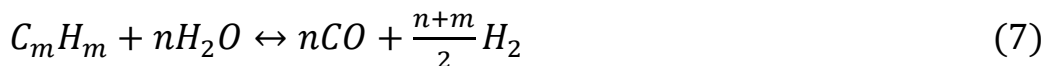
1.1.2 Parciální oxidace ropných frakcí

Jedná se o poměrně rozšířený způsob výroby vodíku, při kterém je základní surovina zplyňovaná kyslíkem a vodní parou při teplotách 1300 – 1500 °C a tlacích 3 – 8 MPa. Základní surovinu tvoří plynné a kapalné suroviny z různých procesů zpracování ropy. Nejčastěji se zplyňují těžké ropné frakce, jako propanové asfalty a vakuová zbytky [4].

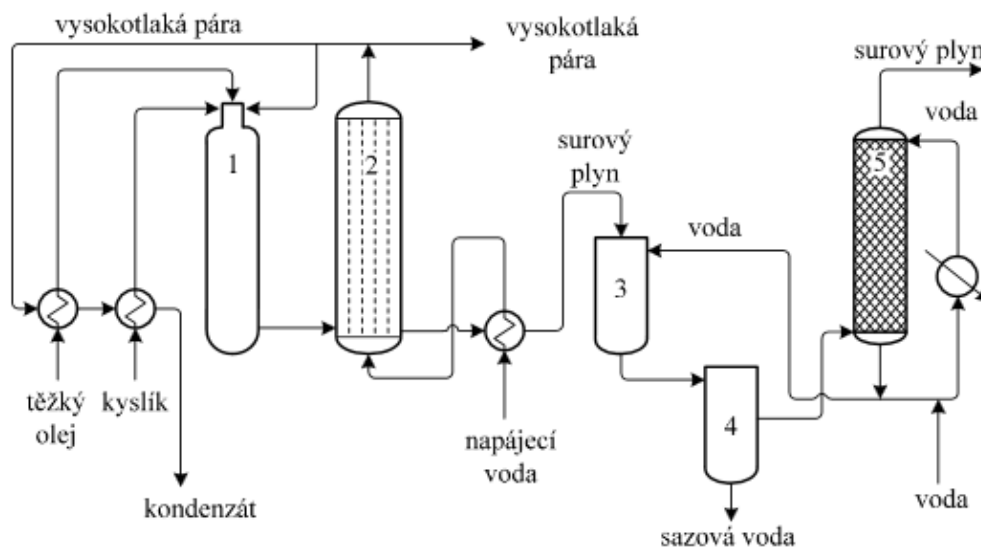
Zplyňování kyslíkem probíhá hlavně podle reakce (5) a částečně podle reakce (6). Při kterých vzniká směs vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. V obou případech se jedná o vysoce exotermní reakce, které ohřejí reakční směs na teplotu až 1 500°C [4].



Vodní parou zplyňujeme část surovin, která nebyla zplyněna kyslíkem. Jedná se o endotermní reakci (7), při které se reakční produkty ochladí na požadovanou úroveň cca 1350 °C. Zplyňování vodní parou rovněž vede ke vzniku většího množství vodíku než při zplyňování kyslíkem [4].



Jako vedlejší produkt při parciální oxidaci vznikají saze, které jsou pro daný proces nežádoucí. Saze vznikají na chladnějších místech v kotli na výrobu páry a jejich množství stoupá se vzrůstající se molekulovou hmotností nástřiku. Saze lze z vody extrahovat benzínem ve vodní pračce. Další možností je vodu obsahující saze smíchat se zplyňovanou surovinou a vrátit zpět na parciální oxidaci. V takovém případě se ale část popela začne usazovat také v generátoru a je nutné během odstávky popel z generátoru odstranit [4].



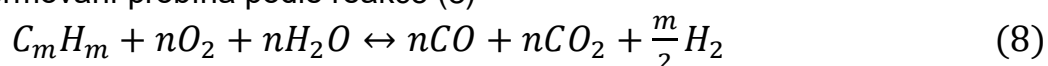
Obr. 1.2 Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů [4]

(1 – zplyňovací reaktor (generátor), 2 – kotel na výrobu páry, 3 – chladič, 4 – separátor, 5 – vodní pračka) [4]

Na obr. 1.2 je uvedeno zjednodušené schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů. Předehřátý ropný olej je zde jemně rozprašován v hořácích do proudu předehřáté směsi kyslíku a vodní páry. Vzniklá směs následně vstupuje do zplynovacího reaktoru, kde se mění na plyn. Generátorový plyn o teplotě cca 1350°C je následně veden do kotle na výrobu páry. Aby se omezilo ukládání sazí v kotli na výrobu páry, je nutné, aby plyn procházel kotlem vysokou rychlostí. V kotli na výrobu páry je plyn ochlazen na teplotu o několik stupňů nad teplotu nasycené vodní páry (cca 260°C, záleží však na přebytku vodní páry v reakční směsi) a současně je zde vyrobena vysokotlaká vodní pára o tlaku až 15 MPa. Přibližně 20 % vyrobené páry se využije v procesu parciální oxidace, zbytek páry zůstává dispozici pro jiná využití. Generátorový plyn následně vstupuje do chladiče kde je chlazen nástřikem vody, při čemž dojde k odstranění většiny sazí. Zbytek sazí se odstraňuje ve vodní pračce. Dále se z vyrobeného surového generátorového plynu vypere sulfan a CO se zkonvertuje na CO₂ stejně jako tomu bylo u parního reformingu. Vzniklý CO₂ se z plynu vypere např. etanolaminem a zbytky CO a CO₂ se poté metanizují stejně jako při parním reformováním [4].

1.1.3 Zplyňování uhlí

Speciálním případem parciální oxidace je zplyňování uhlí. Vodík je zde získáván z uhlí redukcí vodní páry uhlíkem. Základem procesu zplyňování uhlí je reakce uhlí s kyslíkem a vodní parou. Tento proces probíhá za teplot 600 – 1200°C dle zplyňovací technologie, a se zvýšeným tlakem 2 MPa [3]. Výsledkem je směs vodíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého, methanu a dusíku [5]. Dalším krokem je reformování, při kterém je obvykle výtěžek vodíku ještě zvyšován. Reformování probíhá podle reakce (8)



Následuje vodní konverze plynů a vypírací procesy, které umožňují získat vodík o čistotě až 95 % [3].

1.2 Výroba vodíku štěpením vody

1.2.1 Elektrolýza vody

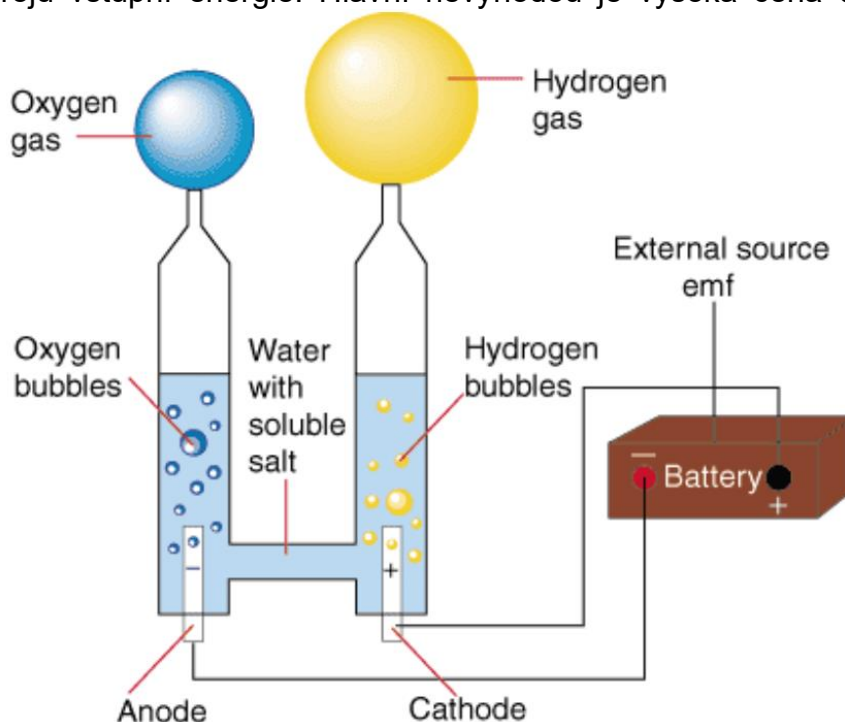
Elektrolýza patří k nejstarším metodám výroby vodíku. Uplatňuje se zejména tam, kde je k dispozici levný zdroj elektrické energie, nebo kde je požadován čistý vodík [6].

Elektrolýzou vody rozumíme děj, při kterém se na katodě uvolňuje vodík a na anodě kyslík, při čemž poměr vyrobeného vodíku ku kyslíku je 2:1. Během elektrolýzy se spotřebovává voda a elektrická energie. Voda je však sama o sobě málo vodivá, a tak se na místo vody pracuje s vodnými roztoky elektrolytu, nejčastěji s roztokem hydroxidu draselného a hydroxidu sodného. Reakce na elektrodách vyjadřují rovnice (9,10) [6].



Účinnost tohoto procesu se pohybuje v rozmezí přibližně 70 – 80%. Celková účinnost se ale odvíjí především od účinností výroby elektrické energie, ta je pro stávající zdroje 20 – 30 %. Celková účinnost elektrolýzy je tedy přibližně 25 – 35 % [5].

Výhodou elektrolýzy je především vysoká čistota vodíku a možnost použití různých zdrojů vstupní energie. Hlavní nevýhodou je vysoká cena elektrické energie [5].



Obr. 1.3 Schéma elektrolýzy vody [7]

1.2.2 Vysokoteplotní elektrolýza

Vysokoteplotní elektrolýza, někdy nazývaná též parní elektrolýza, je charakteristická tím, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla. Přivedené teplo má za následek snížení spotřeby elektrické energie a snazší překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Díky tomu má vysokoteplotní elektrolýza vyšší celkovou účinnost, a to i přes to, že celková potřebná energie pro elektrolýzu mírně roste kvůli nutnému ohřevu páry [5].

Do elektrolýzérů vstupuje směs páry a vodíku (vodík tvoří přibližně 10 % hm.). Vodík na katodě udržuje reduktivní prostředí a je nezbytný pro fungování elektrolýzy. Iont kyslíku prochází membránou a po oxidaci na anodě je odváděn ze systému. Výstupem je obohacená směs tvořící přibližně 90 % hm. vodíku a 10 % páry. Voda je následně oddělena v kondenzační jednotce. Část vyrobeného vodíku se vrací zpět do systému. Proces probíhá za teplot v rozmezí 600 – 1000°C a celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy může dosahovat až 45 % [5].

1.2.3 Fotoelektrolýza

Fotoelektrolýza využívá sluneční světlo k přímému rozkladu vody na vodík a kyslík. Tato technologie používá podobných polovodičových materiálů jako v oblasti fotovoltaniky. Ve fotovoltanice dva polovodičové materiály (p-typu a n-typu) vytvoří p-n přechod, u kterého se tvoří trvalé elektrické pole. Při dopadu fotonu s dostatečnou energií dojde k uvolnění elektronu, po kterém vznikne mezera. Elektrické pole, vytvořené p-n přechodem, způsobuje, že se elektrony i mezery pohybují v opačných směrech, a to v případě připojení vnějšího zatížení má za následek vytváření elektrického proudu. Pokud ale fotokatodu (p-typ materiálu s nadbytkem děr) nebo fotoanodu (n-typ materiálu s nadbytkem elektronů) ponoříme do vodného elektrolytu, budeme namísto vytváření elektrického proudu štěpit vodu na vodík a kyslík [3]. Reakce na polovodičové anodě je popsána rovnicí (11), a reakce na katodě rovnicí (12) [6].

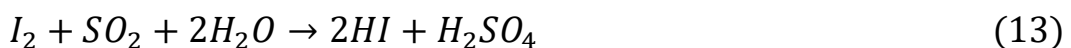


1.2.4 Thermochemické štěpení vody

Při thermochemickém štěpení vody je voda rozdělována na vodík a kyslík za pomoci vysokých teplot a sérii po sobě jdoucích chemických reakcí. V současnosti existuje přibližně 300 thermochemických cyklů. Jedná se o cykly uzavřené, chemické látky jsou tedy v průběhu reakcí recyklovány a vrací se znovu do procesu [5,3].

Jedním z nejznámějších thermochemických cyklů je siřičito-jódový thermochemický cyklus. Vstupní surovinou je voda a vysokopotenciální teplo. Jód a oxid siřičitý se recyklují a opětovně vrací do procesu. Teoreticky by tedy nemělo docházet ke ztrátám, v reálném případě ale k menším ztrátám dochází a je potřeba chemické látky průběžně doplňovat. Výstupem je kyslík s vodíkem a nízkopotenciální teplo [1].

Při produkci vodíku probíhají následující reakce.



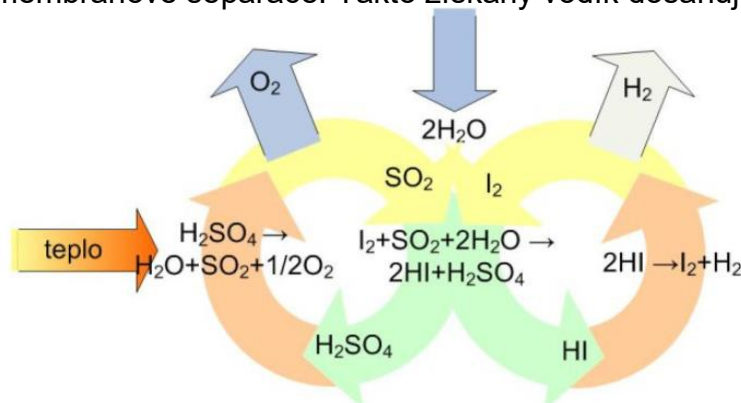
V reakci (13), známé též jako Bunsenova reakce, vstupující voda reaguje s jódem a oxidem siřičitým za vzniku kyseliny sírové a jodovodíku. Reakce je exotermní a je z ní odváděno teplo o teplotě 120 °C [5].



V reakci (14) probíhá endotermický rozklad kyseliny sírové, který vyžaduje teplo o teplotě 800 – 1000 °C [5]. Důvodem jsou vysoce agresivní podmínky a nutnost použití chemicky odolných materiálů [3].



V reakci (15) probíhá rozklad jodovodíku, který vyžaduje teploty nižší 450°C [5]. Tento rozklad je ale problematický v separaci neobvyklé azeotropní směsi HI, H₂, I₂ a vody. K řešení lze použít kombinovanou technologii elektrodialýzy a membránové separace. Takto získaný vodík dosahuje čistoty nad 99 % [3].



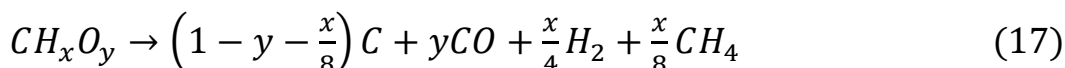
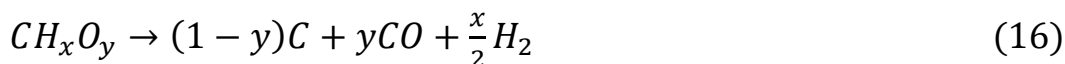
Obr. 1.4 Principiální znázornění siřičito-jódového thermochemického cyklu [5]

Účinnost celého výrobního cyklu vodíku je v rozmezí 40 – 52 %. Nevýhody tohoto cyklu jsou požadavky vysokých vstupních teplot a vysoké nároky na chemickou odolnost použitých materiálů, z důvodů agresivity kyseliny sírové a kyseliny jodovodíkové. [5].

1.3 Výroba vodíku z biomasy

1.3.1 Parní reforming biomasy

Výroba vodíku parním reformingem biomasy se skládá ze dvou základních fází. První z nich se nazývá pyrolýza a je popsána reakcemi (16,17). Při pyrolýze vznikají z biomasy převážně plynné produkty (methan, vodík, oxid uhelnatý) [8].



Ve druhé fázi, jsou zbylé organické pevné látky a methan převedeny pomocí vodní páry o teplotě 600 – 1000 °C na oxid uhelnatý a vodík podle reakce (18). Podobně jako u parního reformingu zemního plynu pro zvýšení výtěžku vodíku a eliminování oxidu uhelnatého převedeme oxid uhelnatý na oxid uhličitý a vodík podle reakce (19) [8].



1.3.2 Vodík z derivátů biomasy

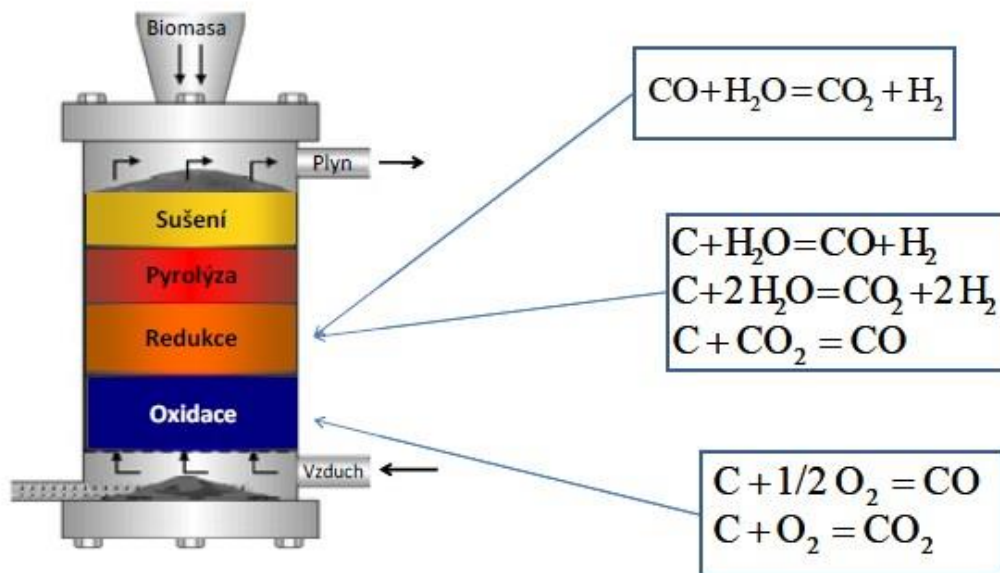
K výrobě vodíku lze také využít derivátů biomasy, například bioethanolu a bioplynu. Deriváty biomasy jsou nejčastěji získávány biotechnologickými procesy. Výroba vodíku z derivátů biomasy je zejména zajímavá v oblasti mobilních aplikací kde vodík je obtížné skladovat a distribuovat. Uvažuje se tedy o tzv. on-board reformingu, kde by vodík byl vyráběn přímo ve vozidle ze zásobní látky. V případě bioethanolu by to pak znamenalo spojení výhody kapalného paliva s vyšší účinností technologií vodíkových palivových článků [8].

Jedním z příkladů výroby vodíku z derivátů biomasy je katalytické parní reformování bioplynu. Během tohoto procesu reaguje plyn obsahující methan s vodní parou při teplotě 500-950 ° za přítomnosti katalyzátoru, kterým je obvykle nikl. Proces je popsán reakcemi (20,21) dále je oxid uhelnatý převeden na oxid uhličitý a vodík dle reakce (22) [8].



1.3.3 Zplyňování biomasy

Zplyňování je termochemická přeměna uhlíkatého materiálu pevného či kapalného skupenství na výhřevný energetický plyn za pomoci tepla a zplyňovací média, které tvoří kyslík a vodní pára. V ojedinělých případech je zplyňovací médium obohaceno o CO_2 . Jedná se o komplexní proces, kterého se účastní celá řada reakcí. Základní pochody zplyňování jsou: sušení, pyrolýza, redukce a oxidace. V případě sesuvných generátorů tyto procesy probíhají postupně, mohou probíhat také zároveň, a to v případě generátorů fluidních [9,3].



Obr. 1.5 Princip zplyňování biomasy v sesuvném protiproudém generátoru [9]

Vyprodukovaný plyn obsahuje výhřevné složky (H_2 , CO , CH_4 a další menšinové složky), doprovodné složky (CO_2 , H_2O , N_2) a znečišťující složky (např. prach, dehet, sloučeniny síry, chlor atd.) [9]. Pro získání požadované čistoty vodíku je tedy třeba plyn dočistit vypíracími nebo adsorpčními procesy [3].

1.3.4 Přímá biofotolýza

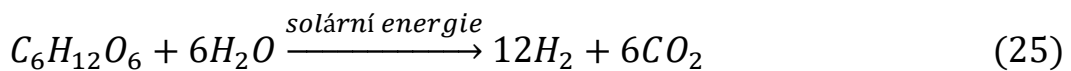
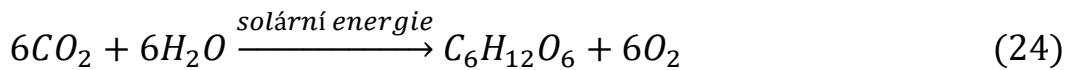
Přímá biofotolýza k výrobě vodíku využívá fotosyntetického systému mikrořas, který slouží k přeměně solární energie na energii chemickou, potřebnou ke štěpení molekul vody za vzniku vodíku. Proces probíhá dle reakce (23) [10].



Při přímé biofotolýze fotosyntetické systémy, známé jako PSI a PSII, využívají schopnosti specializovaných mikroorganismů. Příkladem jsou řasy *Chlamydomonas reinhardtii* a sinice, které jsou používány ke generování kyslíkových a vodíkových iontů a mikrořasy jako zelené řasy a modrozelené řasy *Cyanobacterie*, které jsou používány k produkci vodíku. Nevýhodou této technologie je její nízká účinnost, cca 5%, která i přes pokročilé výzkumy bylo zvýšena na pouhých 15% [10].

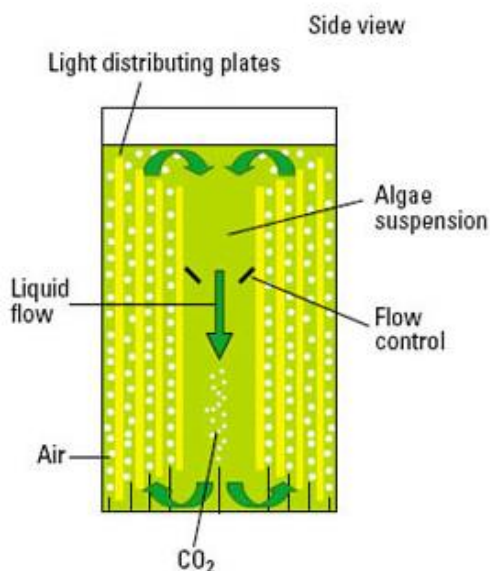
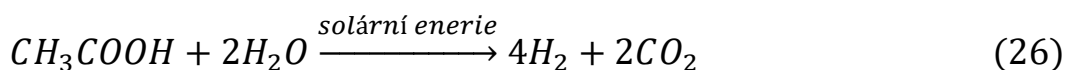
1.3.5 Nepřímá biofotolýza

Nepřímá biofotolýza se skládá ze čtyř kroků: produkce biomasy fotosyntézou, koncentrace biomasy, aerobní tmavá fermentace a konverze 2 molů acetátu na vodík. Nepřímá biofotolýza k produkci vodíku využívá Cyanobakterie obsahující fotosyntetická barviva, která za přijatelných vyživovacích podmínek (vzduch, voda, minerální soli, světlo), mohou sloužit oxidačním fotosyntézám. Vodík je zde produkován jak hydrogenázou, tak nitrogenázou. Nepřímá biofotolýza probíhá dle reakcí (24,25) [10].



1.3.6 Fotofermentace

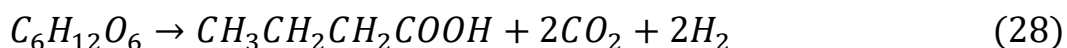
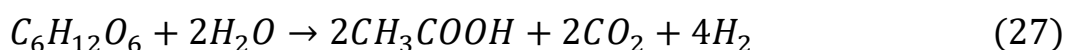
Během fotofermentace jsou organická látka nebo biomasa přeměňována fotosyntetickými bakteriemi na vodík a oxid uhličitý, a to za současného využití solární energie. Proces probíhá za anaerobních podmínek. Příkladem skupiny mikroorganismů schopných fotofermentace jsou purpurové bezsírné bakterie [10], které i přesto že jejich fotosystém není dostatečně silný k přímé fotolýze vody, jsou za anaerobních podmínek schopny využít jednoduchých organických kyselin [8]. Z organicky vázaného uhlíku jsou uvolněny elektrony, které jsou v přítomnosti dusíku využity nitrogenázou k redukci molekulárního dusíku na amoniak. Probíhali proces bez dusíku a solární energie, dochází k redukci organických kyselin nebo biomasy na vodík dle reakce (26) [10]. Fotofermentace dosahuje účinnosti až 9,2 % [8].



Obr. 1.6 Schéma fotofermentace a prototyp slunečního kolektoru [8]

1.3.7 Tmavá fermentace

Narozdíl od fotofermentace, tmavá fermentace (známá také jako vodíková fermentace) probíhá bez přítomnosti světla. Jedná se o přirozený děj, který probíhá za anoxických (tj. bez přítomnosti kyslíku jako akceptoru elektronu) nebo anaerobních podmínek. Organické látky jsou zde využívány jako primární zdroj vodíku a energie. V anoxickém prostředí různé druhy bakterií využívají redukci protonů na molekulový vodík. Hlavními produkty tmavé fermentace jsou vodík a oxid uhličitý, v menší míře jsou produkovány také další plyny např. methan a sulfan. Podle rovnice (27) výtěžek dosahuje teoretického maxima 4 moly vodíku na 1 mol glukózy. Současně dochází ke vzniku 2 molů acetátu, ve kterých jsou fixovány další 4 moly vodíku. V praxi ale výroby 4 mol vodíku na mol glukózy nemůže být nikdy dosaženo, neboť kromě acetátu obsahují konečné produkty také butyráty, jak lze vidět v rovnici (28) [8,10].



1.4 Ekonomické shrnutí vybraných metod

Data tab.1 jsou převzata ze [45] a shrnují náklady na výrobu vodíku pro vybrané metody. Vzhledem k tomu, že konečnou cenu vodíku ovlivňuje velké množství faktorů a, že cena vodíku se v průběhu let neustále mění je třeba brát tyto hodnoty pouze informačně.

Metoda	Zdroj energie	Vstupní surovina	Cena vodíku [\$/kg]
Parní reformování metanu	Standardní fosilní paliva	Zemní plyn	2.27
Zplyňování uhlí	Standardní fosilní paliva	Uhlí	1.63
Pyrolýza biomasy	Generovaná pára	Dřevní biomasa	1.25 – 2.20
Zplyňování biomasy	Generovaná pára	Dřevní biomasa	1.77 – 2.05
Přímá biofotolýza	Slunce	Voda + řasy	2.13
Nepřímá biofotolýza	Slunce	Voda + řasy	1.42
Elektrolýza	Slunce	Voda	5.78 – 23.27
Elektrolýza	Vítr	Voda	5.89 – 6.03
Elektrolýza	Jádro	Voda	4.15 – 7.00
Fotoelektrolýza	Slunce	Voda	10.36

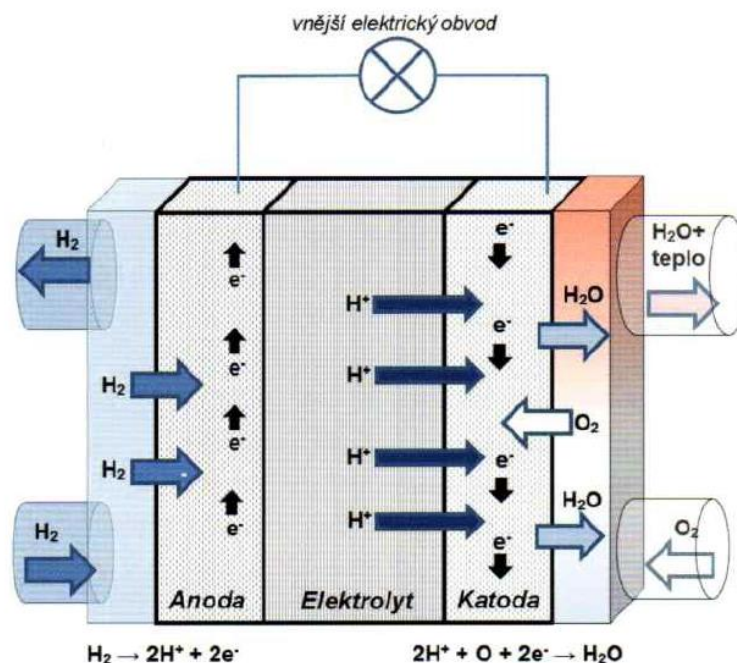
Tab. č.1 Ekonomické porovnání vybraných metod výroby vodíku [45]

V současnosti se cena vodíku pohybuje mezi 227 až 252 Kč za kilogram. V následujících 10 letech se ale očekává pokles ceny vodíku o zhruba 50 %. Vodík by pak tedy jako pohonná hmota mohl v následujících letech konkurovat benzínu a naftě [46].

2 PALIVOVÉ ČLÁNKY

2.1 Palivový článek

Palivovým článkem rozumíme zařízení, které z vodíku elektrochemickou cestou vyrábí elektrický proud. Na elektrodách palivového článku, umístěných v elektrolytu, se chemickou reakcí vstupních látek (paliva a okysličovadlo), přeměňuje chemická energie na energii elektrickou. Palivem bývá nejčastěji čistý vodík, ale může jím být i jiná surovina (např. zemní plyn, bioplyn a líh) z níž je vodík před vstupem do palivového článku chemicky uvolněn. Okysličovadlem bývá nejčastěji velmi čistý vzdušný kyslík. Princip palivového článku je znázorněn na Obr.2.1 Z vodíku jsou na anodě odštěpovány volné elektrony, které při průchodu vnějším obvodem vytvářejí elektrický proud. Kationty vodíku procházející elektrolytem se na katodě slučují se vzdušným kyslíkem a s elektrony z vnějšího obvodu, v důsledku toho dochází ke vzniku vodní páry. Pro odštěpení volných elektronů z vodíku je nutná přítomnost katalyzátoru. U mnoha typů palivových článků se jako katalyzátor používá platina. Přestože se v palivovém článku používá pouze mikroskopické množství platiny a podílí se tedy na celkové ceně pouze několika málo procenty, její vzácnost by v budoucnosti mohla znamenat problém a je tedy snaha nahradit platinu jinými materiály [11].

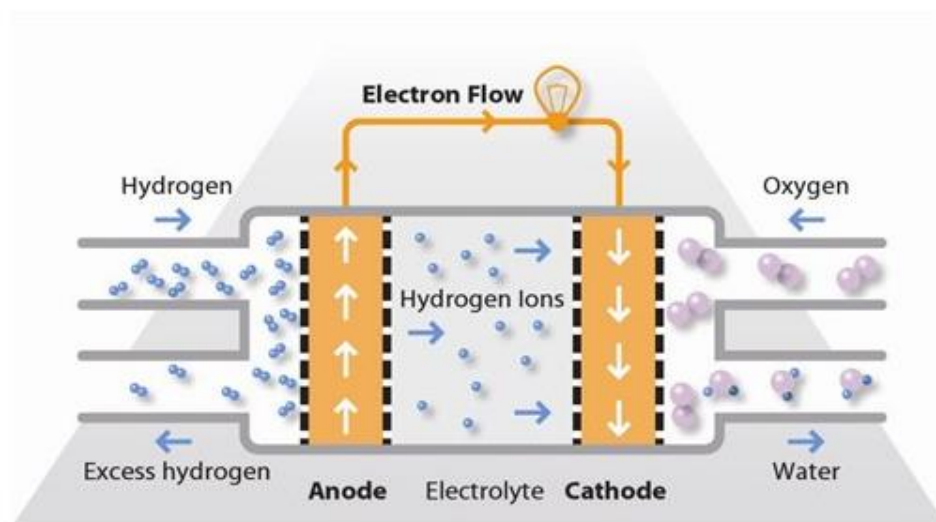


Obr.2.1 Princip palivového článku [11]

Hlavním problémem palivových článků je jejich vysoká cena a z důvodu používání čistého vodíku, také nedostatečné vodíková plnicí infrastruktura. Díky jeho výhodám (např. plně bezemisní provoz) je ale tato technologie velmi podporována ze strany vlád a průmyslu. Dá se tedy očekávat, že jejich rozšiřování povede k poklesu výrobních nákladů i cen [11].

2.2 Typy palivových článků

2.2.1 Palivový článek s polymerní membránou (PEMFC)



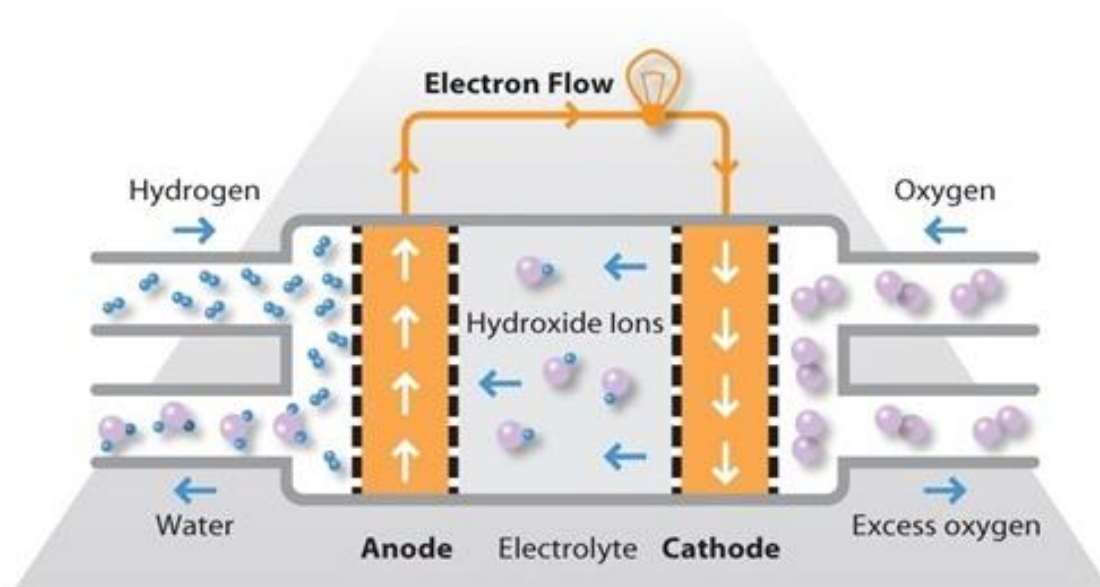
Obr.2.2 Princip palivového článku s polymerní membránou [16]

PEMFC je jedním z nejvyvinutějších a nejběžnějších palivových článků. Používá se většinou pro pohon lehkých užitkových vozidel, ale dá se použít i jako záložní zdroj místo stacionárních baterií v kancelářích. Jako elektrolyt používá polymerní membránu, která funguje jako protonový vodič. PEM palivové články pracují při provozní teplotě 50 – 100 °C, a mají účinnost 35-60 %. Palivem je čistý vodík. Jako katalyzátor se používá nejčastěji Pt, případně Pt/Rh a jiné [5,12,16]. Výhodou tohoto palivového článku je vysoký poměr vyrobené energie k hmotnosti a relativně rychlý náběh. Nevýhodou jsou pak vysoké výrobní náklady a složitý systém regulace vody [12].



Obr.2.3 Palivový článek s polymerní membránou [5]

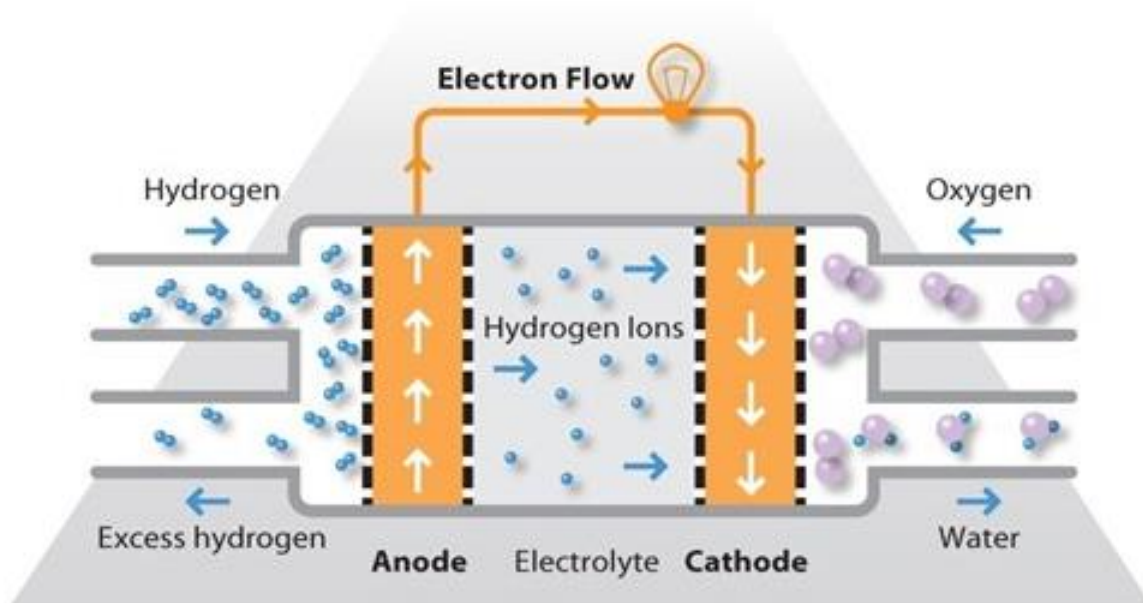
2.2.2 Alkalický palivový článek (AFC)



Obr.2.4 Princip alkalického palivového článku [18]

Hlavními oblastmi využití alkalických palivových článků jsou letectví a kosmonautika. Jako elektrolyt se používá 85 % hm. KOH pro články pracující při vyšších teplotách ($\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) a 35 – 50 % hm. pro články pracující při nižších teplotách ($< 120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Účinnost AFC se pohybuje kolem 60 % a jako palivo používá čistý kyslík a vodík. Výhodou AFC je možnost využití levných katalyzátorů na bázi stříbra, kobaltu nebo platiny. Další výhodou jsou pak velmi nízké výrobní a provozní náklady. Hlavní nevýhodou je čistota paliva a oxidačního činidla, kdy i malá množství CO_2 obsažené např. v ovzduší znečištěného města může palivový článek poškodit. Další nevýhodou jsou velké rozměry oproti palivovým článkům typu PEM [5,12].

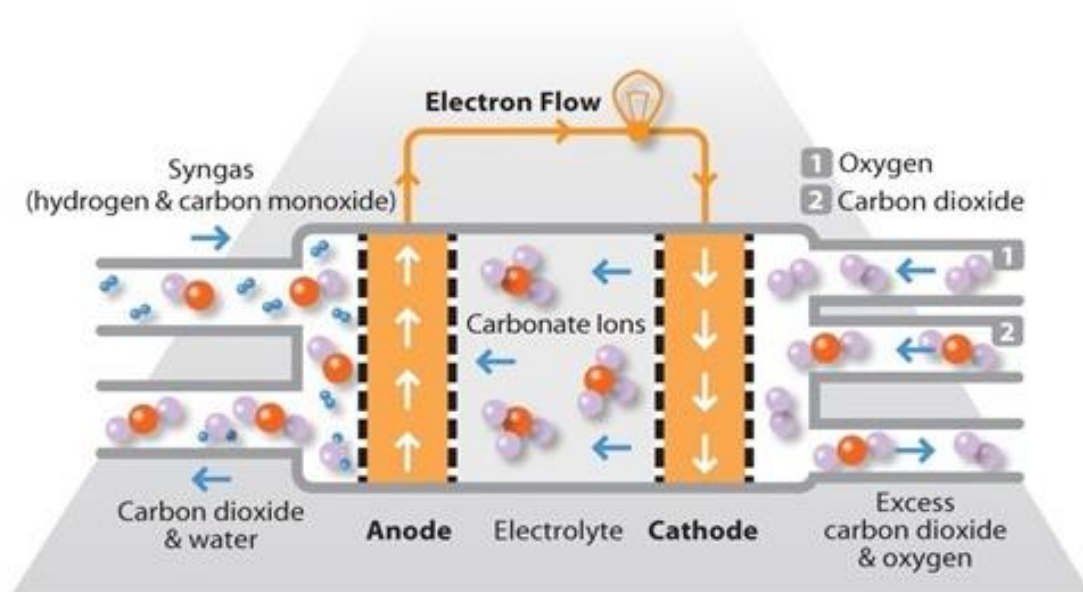
2.2.3 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)



Obr.2.5 Princip palivového článku s kyselinou fosforečnou [13]

Tento typ palivových článků nachází uplatnění především ve stacionárních generátorech energie s výkonem 100 – 400 kW, ale dá se použít i ve velkých vozidlech jako jsou autobusy [13]. Jako elektrolyt pro PAFC se používá 100% kyselina fosforečná. Ta je stabilnější než ostatní běžné kyseliny a je tedy schopna pracovat v širokém rozsahu teplot [5]. Článek pracuje za teploty 150 – 200 °C s nižší účinností než u ostatních typů palivových článků cca 40 % [12]. Pokud ale je procesní teplo využito pro kogeneraci, může být celková účinnost vyšší než 80 % [13].

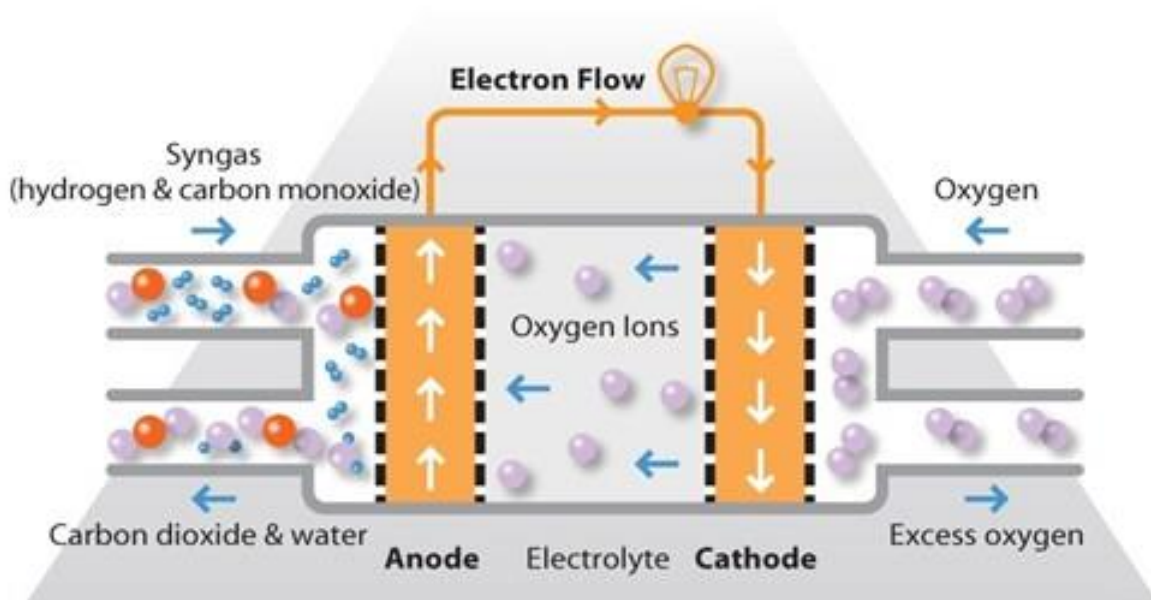
2.2.4 Palivový článek s tekutým uhličitánem (MCFC)



Obr.2.6 Princip palivového článku s tekutým uhličitánem [15]

MCFC se používá pro stacionární výrobu energie. Velké uplatnění nalézá v palivočlánekových elektrárnách o kapacitě megawattů [15]. Elektrolyt je většinou tvořen směsí alkalických uhličitánů zadržovaných v porézním nosiči LiAlO_2 [5]. Účinnost palivového článku se obvykle pohybuje v rozmezí 45 – 50 % a jeho provozní teplota je mezi 600 – 700 °C [12]. díky vysokým teplotám MCFC nemusí využívat katalyzátor z vzácných kovů a dovede pracovat s různými palivy, včetně metanu a zemního plynu získaného z uhlí. Nevýhodou je koroze způsobená vysokou teplotou a korozivní povahou elektrolytu [15].

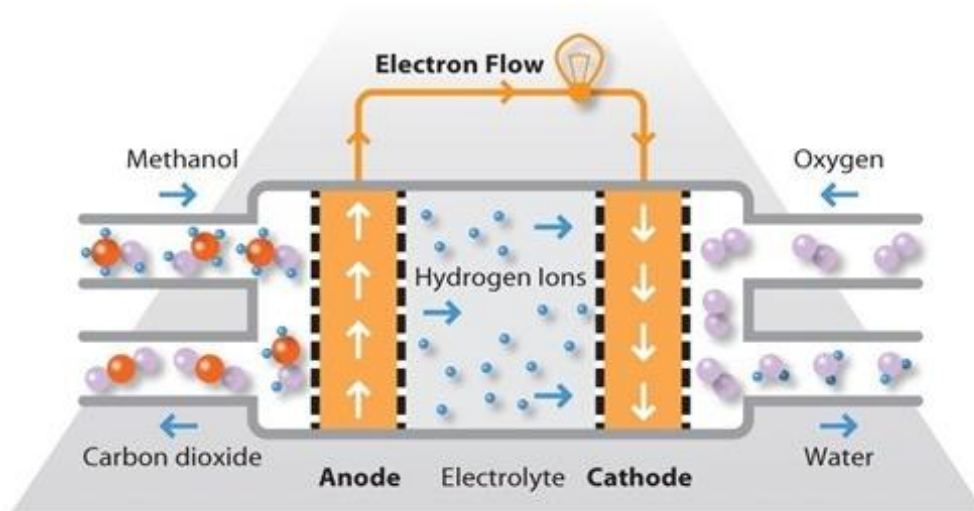
2.2.5 Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC)



Obr.2.7 Princip palivového článku s tuhými oxidy [14]

Oproti ostatním typům palivových článků používá SOFC jako elektrolyt pevný, neporézní oxid kovu, nejčastěji Y_2O_3 stabilizovaný ZrO_2 [5]. Dřívější SOFC se vyznačovali vysokou pracovní teplotou 800 – 1000 °C, ale nová generace keramických materiálů posunula pracovní teplotu na lépe zvládnutelných 500 – 600 °C. Díky tomu mohou být pomocné díly vyrobeny z běžné nerezové oceli namísto drahé keramiky. Jako palivo se nejčastěji používá zemní plyn, ze kterého je díky vysoké teplotě přímo uvolňován vodík procesem katalytického reformingu. Kvůli vysoké teplotě je ale nutná použití neobvyklých materiálů, což má za následek vysoké výrobní náklady a sníženou životnost. Velkou výhodou SOFC je schopnost přijmout palivo na bázi uhlíku bez použití zušlechťovacích zařízení [12]. SOFC se dále vyznačuje velkou účinností, která běžně dosahuje přes 60 %. Je-li ale teplo která produkují využito, celková účinnost může být přes 80 % [14].

2.2.6 Palivový článek pro přímou reakci metanolu (DMFC)



Obr.2.8 Princip palivového článku pro přímou reakci metanolu [17]

Poslední typem palivového článku je DMFC. Pozornost si získal především v oblasti přenosných palivových článků. Oproti ostatním typům palivových článků je DMFC malý, není drahý na výrobu, je praktický a nepotřebuje stlačený vodíkový plyn. Díky doplňování, které se provádí vstříknutím kapaliny nebo výměnou zásobníku s náplní DMFC umožňuje nepřetržitý provoz. Pracovní teplota DMFC se obvykle pohybuje mezi 40 – 60 °C a oproti ostatním typům palivových článků dosahuje poměrně nízké účinnosti cca 20 % [12]. Stejně jako u PEMFC používá DMFC jako elektrolyt polymerní membránu. Jeho platino-rutheniový katalyzátor na anodě je však schopen čerpat vodík z kapalného metanolu, a proto lze jako palivo použít čistý metanol, který je levný, má relativně vysokou hustotu energie a lze jej snadno skladovat [17].

Tabulka č.2 stručně shrnuje charakteristiky jednotlivých typů palivových článků. Teploty a účinnosti v tabulce odpovídají běžným hodnotám a mohou se u jednotlivých modelů mírně lišit.

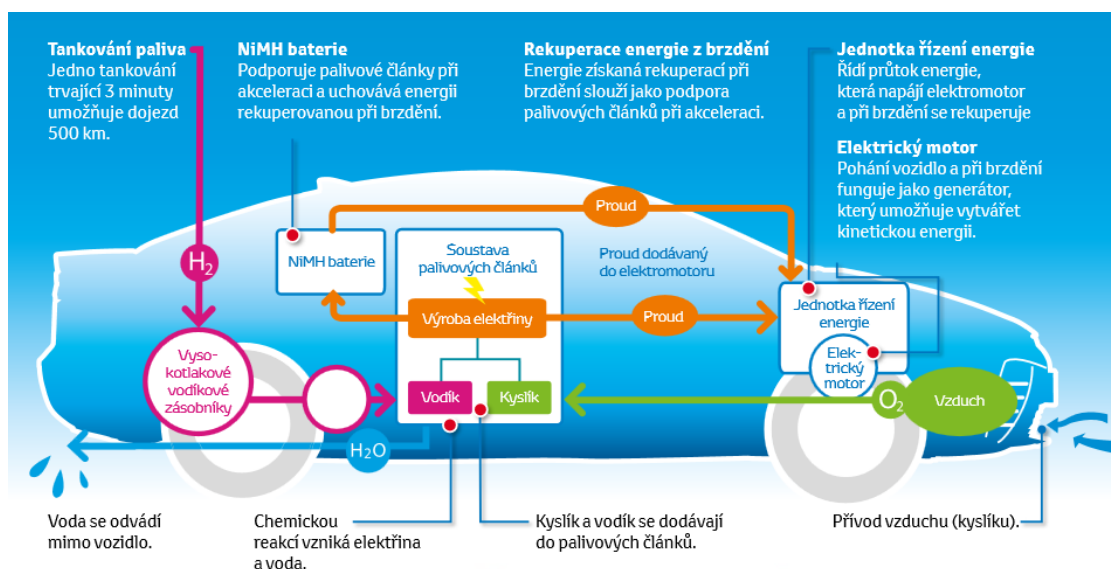
Druh palivového článku	Použití	Teplota jádra Účinnost	Výhody	Omezení
Palivový článek s polymerní membránou (PEMFC)	Přenosná i stacionární zařízení a automobilový průmysl	50 – 100 °C Obvykle 80 °C Účinnost 35 – 60 %	Kompaktní provedení, dlouhá životnost, rychlý náběh, pokročilý vývoj	Drahý katalyzátor, potřebuje palivo vysoké chemické čistoty, složitá regulace teploty a vody
Alkalický palivový článek (AFC)	Ve vesmíru, vojenství, ponorkách, a dopravě	90 – 100 °C Účinnost 60 %	Nízké náklady na díly a provoz	Velké rozměry, citlivost na nečistoty vodíku a kyslíku
Palivový článek s tekutým uhlíčanem (MCFC)	Pro dosažení velké výroby energie	600 -700 °C Účinnost 45 – 50 %	Vysoká účinnost, Může pracovat s vícero palivy, kogenerace	Vysoká teplota způsobuje korozi, dlouhý náběh, krátká životnost
Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)	Pro dosažení střední až velké výroby energie	150 – 200 °C Účinnost 40 %	Dobře snáší nečistoty v palivu, kogenerace	Nízká účinnost, omezená životnost, drahý katalyzátor
Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC)	Pro dosažení střední až velké výroby energie	700-1000 °C Účinnost 60 %	Bez vysokých nároků na palivo, můžu používat zemní plyn, vysoká účinnost	Vysoká teplota způsobuje korozi, dlouhý náběh, krátká životnost
Palivový článek pro přímou reakci metanolu (DMFC)	Přenosné, mobilní a stacionární zařízení	40 – 60 °C Účinnost 20 %	Kompaktní, běží na metanol, žádný kompresor	Složitost uspořádání palivového článku s pomocným systémem, pomalá odezva, nízká účinnost

Tab č.2 Výhody a omezení jednotlivých typů palivových článků [12]

3 PALIVOČLÁNKOVÁ MOBILITA

3.1 Palivočláňkové automobily

Palivočláňkové osobní a užitkové automobily jsou v dnešní době zvolna zahrnována do nabídek významných světových automobilek. Jako je Hyundai nebo Toyota. U pohonu osobních automobilů je palivočláňková energetická jednotka používána buď jako hlavní zdroj energie o výkonu cca 100 kW, doplněný trakčními bateriemi, které slouží k vyrovnávání výkyvů v okamžité potřebě energie (příkladem jsou palivočláňkové osobní vozy Hyundai ix35 a Toyota Mirai), nebo jako několikakilowattový prodlužovač vzdálenosti k bateriovému elektromobilu (příkladem je užitkový vůz Renault Kangoo ZE-H2). Palivočláňkové osobní automobily využívají čistý vodík o dvakrát větším tlaku, než je tomu u palivočláňkových autobusů. Díky tomu je možné do nádrže osobního automobilu uložit větší množství paliva. Tohle řešení je však náročnější na použité materiály a je tedy i nákladnější. Dojezd palivočláňkových automobilů na jedno naplnění nádrže je zpravidla kolem 400 – 600 km (v případě užitkových automobilů kolem 300 km) při čemž naplnění nádrže trvá řádově jednotky minut. Jak dojezd, tak doba plnění je tedy srovnatelná s tradičním pohonem využívající spalovací motor [11].



Obr.3.1 Princip fungování elektrického pohonu automobilu s vodíkovými palivovými články [19]

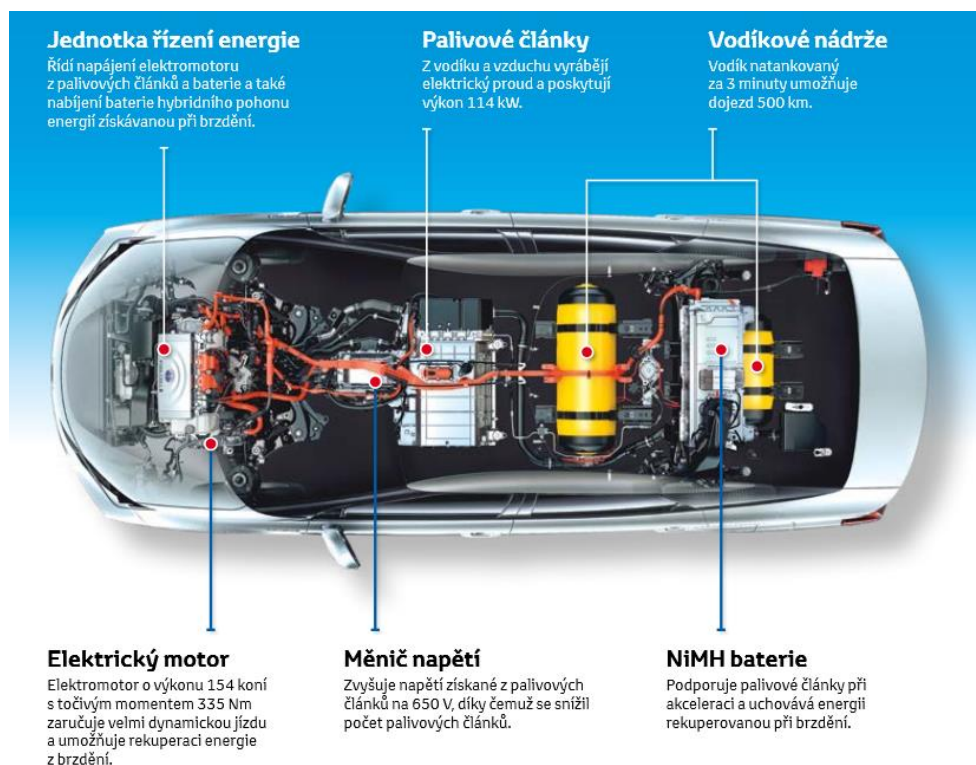
3.2 Příklady palivočlánkových automobilů

3.2.1 Toyota Mirai



Obr.3.2 Toyota Mirai [19]

Toyota Mirai se začala prodávat na japonském trhu od prosince roku 2014 a v roce 2015 se tento vůz objevil v USA a na vybraných evropských trzích. Toyota Mirai se vyznačuje velkým dojezdem (500 km), rychlým tankováním (3 – 5 minut), a výkonem (až 114 kW) na úrovni vozidel poháněných spalovacím motorem. Oproti vozidlům se spalovacím motorem je navíc Mirai velmi tichý a zcela bez emisí automobil [19].



Obr.3.3 Pohonná soustava Toyoty Mirai [19]

3.2.2 Hyundai ix35 Fuel Cell



Obr.3.4 Hyundai ix35 Fuel Cell [20]

Hyundai ix35 je palivočlánkový elektrický automobil poháněný indukčním elektromotorem. Zdroj energie tvoří palivový článek o výkonu 100 kW. Obsahuje 0,95 kW lithium-polymerové baterie, do kterých je ukládána přebytečná energie. Díky dvěma nádržím na vodík o celkové kapacitě 5,64 kg plynu, dojezd automobilu činí až 588 km [11]. V současnosti je výroba tohoto modelu ukončena a nahrazena novým modelem Hyundai Nexu.

3.2.3 Renault Kangoo ZE-H2



Obr.3.5 Renault kangoo ZE-H2 [24]

Renaul Kangoo ZE-H2 je užitkový elektromobil s palivočlánkovým prodlužovačem dojezdu. Základem jeho konstrukce je Renault Kangoo ZE, který je vybaven 44kW elektromotorem. Pod jeho podlahou jsou umístěny 22kWh lithium-iontové trakční baterie, které slouží jako zásobník energie a umožňují dojezd na jedno nabití až 170 km při maximální rychlosti 130 km/h. U verze H2 je elektrický pohon doplněn o palivočlánkový prodlužovač dojezdu. Jako palivo používá čistý vodík o tlaku 35 nebo 70 MPa při čemž spotřeba paliva činí 1 kg/100 km v městském provozu. Do nádrže se vejde 1,5kg vodíku a celkový dojezd vozidla na jedno nabití trakčních baterií a naplnění nádrže je tedy podle výrobce přibližně 320 km v městských podmínkách [21].

3.3 Palivočláňkové autobusy

Díky spojení výhod bezemisního provozu elektrických vozidel a dojezdu dostačujícího pro celodenní provoz, patří palivočláňkové autobusy k důležitým vývojovým směrům v oblasti bezemisní městské dopravy. Koncepce palivočláňkových jednotek pro autobusy sahají od cca 100 a více kilowattového palivového článku sloužícího jako hlavní zdroj energie, doplněného o slabší baterie vyrovnávající výkyvy ve spotřebě (příkladem je palivo čláňkový autobus EvoBus), po převážně bateriové elektrobuses vybavené palivočláňkovými prodlužovači dojezdu (příkladem je kloubový elektrobuses Solaris s přídatnou palivočláňkovou jednotkou) [11].



Obr.3.6 Palivo čláňkový autobus Toyota Sora [19]

Příkladem novějšího palivočláňkového autobusu je Toyota Sora, její prodej začal v roce 2018 a její název vznikl ze složení prvních písmen anglických slov Sky, Ocean, River, Air, a symbolizuje tak koloběh vody na planetě Zemi [19].

Sora je dvounápravové vozidlo s interiérem o kapacitě 78 cestujících z nich je 22 sedících a 56 stojících. Sora je zajímavá tím, že se její neobsazená sedadla automaticky sklápějí a uvolňují tak prostor pro invalidní vozíky nebo kočárky, rovněž automatické sklápění sedadel má za následek pohodlnější pohyb cestujících ve vozidle. K bezpečnosti provozu přispívá systém osmi kamer, sledujících prostor kolem vozidla a upozorňuje tak řidiče na chodce nebo cyklisty pohybující se v těsné blízkosti vozidla. Pohon autobusu tvoří dvojice elektromotorů, z nichž každý má výkon 113kW. Potřebnou energii dodává dvojice palivových článků o celkové kapacitě 235 kWh doplněné o NiMH trakční baterie které slouží k ukládání rekuperované energie a představují tak sekundární zdroj energie. Autobus je vybaven deseti nádržemi o objemu 600 litrů umístěných na střeše, které slouží k uložení vodíku stlačeného na 700 barů, při čemž doba tankování paliva trvá přibližně 10 minut a dojezd vozidla se pohybuje kolem 200 km [22].

3.4 Palivočlánkový vlak Coradia iLint

Palivočlánkový vlak Coradia iLint od společnosti Alstom představuje funkční bezemisní alternativu pro dieselové osobní vlaky na neelektrifikovaných regionálních tratích. V současnosti jezdí tyto vlaky v německé spolkové zemi Dolní Sasko a v roce 2022 se změnou jízdního řádu budou uvedeny do provozu také ve spolkové zemi Hesensko v okolí Frankfurtu. Coradia iLint je dvoudílný vlak o kapacitě 160 sedících cestujících, založený na sériových dieselových vlcích Lint 54, jejichž pohonná jednotka byla nahrazena palivočlánkovou. Nádrže o kapacitě 94 kg vodíku a palivový článek od firmy Hydrogenics se nachází na střeše každého z dvou vozů. Každý vůz je poháněn trakčním elektromotorem doplněným o lithium iontové trakční baterie a trakčním invertorem měnící stejnosměrný proud na střídavý. Rychlost vlaku je až 140 km/h a dojezd na jedno naplnění nádrže činí přibližně 1000 km. Dojezd Coradia iLint je tedy srovnatelný s dojezdem obdobné jednotky poháněné dieselovými motory [24].



Obr.3.7 Palivočlánkový vlak Coradia iLint [25]

4 STACIONÁRNÍ PALIVOČLÁNKOVÉ ZDROJE

Kromě palivočlánekové mobility lze palivočlánekové zdroje používat také jako malé elektrárny a kogenerační jednotky. Jedná se o bezemisní zdroje, které jsou napojeny přímo na místní distribuční síť. Protože je vyprodukovaná energie využívána přímo v místě výroby, dochází pouze k minimálním ztrátám způsobených přenosem a rozvodem elektřiny. Oproti jiným bezemisním zdrojům jako jsou fotovoltaické a větrné zdroje, má palivočlánekový zdroj výhodu konstantního výkonu a nepůsobí tedy výkyvy v dodávkách energie. Vstupní medium pro palivový článek stacionární jednotky bývá nejčastěji zemní plyn nebo bioplyn, jehož reakcí s vodní parou za vysokých teplot pak vzniká vodík (reformování). Palivočlánekové jednotky o větších výkonech (jednotky megawattů) je možná doplnit o expanzní turbínu, ve které plyn sloužící jako zdroj pro palivový článek expanduje a otáčí tak lopatkami turbíny. Díky tomuto vylepšení se pak může celková účinnost zařízení pohybovat kolem 60 % [11].

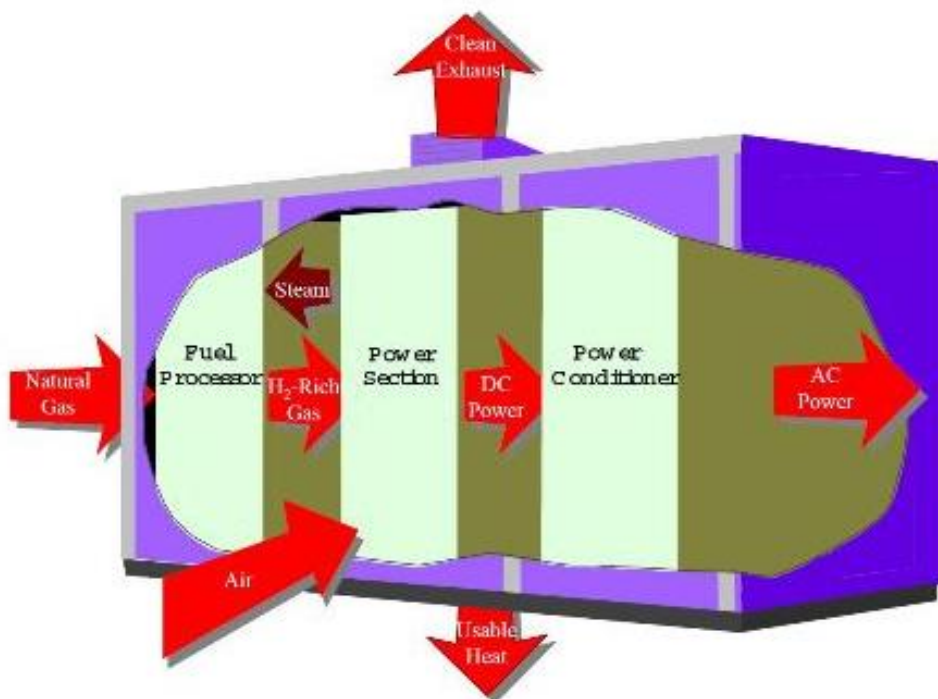


Obr.4.1 Palivočláneková jednotka SureSource 1500 od FuelCell Energy [26]

Skvělým příkladem stacionárního palivočlánekové zdroje jsou palivočlánekové jednotky SureSource od výrobce FuelCell Energy dodávané ve škálovatelné řadě od 1,4 MW do 3,7 MW. Tyto palivočlánekové jednotky používají palivový článek typu MCFC, dají se použít buď pro samostatnou výrobu elektřiny nebo pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla, jsou prakticky bezemisní a jejich energetická účinnost se pohybuje v rozmezí 43 – 47 %. V současnosti jsou používány jako samostatné energetické zdroje v objektech veřejných služeb nebo průmyslu jako jsou městské elektrárny, nemocnice, univerzitní areály atd [27].

4.1 Palivočláňkové mikrokogenerační jednotky

Dalším příkladem stacionárního využití palivových článků jsou menší energetické jednotky pro výrobu elektřiny a tepla tzv. mikrokogenerace označované zkratkou FC-CHP nebo také micro-CHP. Primárním účelem těchto jednotek je výroba elektrické energie. Protože ale palivový článek (nejčastěji typu PEM) pracuje při vysokých teplotách, teplo vzniklé při výrobě elektřiny je dále vedeno do topné soustavy a slouží tak k zateplení budov. Elektrický a tepelný výkon těchto jednotek je řádově v jednotkách kilowattů a hodí se především pro budovy s nižšími požadavky na teplo a vyšší spotřebou elektřiny jako jsou např. rodinné domy nebo malé firmy. Podle očekávání technologie micro-CHP v porovnání s kondenzačním kotlem snižuje v rodinných domech emise skleníkových plynů o přibližně 20 – 40 % [28,29].



Obr.4.2 Jednoduché schéma micro-CHP [28]

Příkladem mikrokogenerační palivočlánekové jednotky je Vitovalor PT2 od německého výrobce Viessmann. Vitovalor PT2 je určen pro jeden až dva rodinné domy. Zdrojem energie je palivový článek s elektrickým výkonem 0,75 kW a tepelným výkonem 1,1 kW doplněný o integrovaný plynový kondenzační kotel který se zapíná vždy když je teplo z palivového článku nedostatečné a zvyšuje tak tepelný výkon na 30,8 kW. Palivový článek s plynový kotel je kompaktní a společně vyžadují plochu 0,72 m². Elektrická účinnost palivového článku je 37 % přičemž celková energetická účinnost 92 %. Kotel při maximálním zatížení pracuje standartně s účinností 98 % [30].



Obr.4.3 Vitovalor PT2 [30]

4.2 Palivočláňkové záložní zdroje energie

Díky svému nepřetržitému provozu nachází palivové články skvělé uplatnění jako záložní zdroje energie, a to především jako zdroje nouzového napájení pro telekomunikační a rozhlasové stanice, průmyslová datová centra a železniční aplikace. Příkladem takového zdroje jsou pak palivočláňkové PM UPS od německého výrobce Proton Motor, které jsou k dostání v širokém rozsahu výkonů a velikostí, podle specifických požadavků zákazníka [31]. Například pro nouzové napájení telekomunikačních věží jsou tyto systémy dodávány s elektrickým výkonem 4 – 8 kW a výstupním napětím 3 x 320 VAC. Díky nádrži, ve které je vodík skladován při 300 barech, jsou tyto systémy schopny pracovat až 72 hodin [32].



Obr.4.4 PM UPS od Proton Motor [31]

5 VYUŽITÍ VODÍKU PRO AKUMULACI ENERGIE

V současnosti je kladena čím dál tím větší snaha o nahrazení fosilních paliv a dosažení uhlíkové neutrality. Z toho to důvodu se také zvyšuje podíl vyrobené elektřiny z obnovitelných zdrojů. Hlavním problémem výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, jako tomu je např. u větrných a solárních elektráren, jsou nepravidelné dodávky energie. Solární elektrárny například produkují nejvíce elektrické energie v poledne, kdy je spotřeba elektřiny nejnižší a nejméně energie naopak produkují ráno a večer, kdy slunce ještě nesvítí a spotřeba elektřiny je nejvyšší. Abychom tedy tyto zdroje mohli efektivně využít je potřeba přebytečnou energii ukládat. V současnosti je elektrické energie akumulována pomocí přečerpávacích vodních elektráren, baterií, setrvačníku a několika dalších technologií. Ty ale mají své nedostatky, např. baterie a setrvačníky nejsou vhodné pro dlouhodobé skladování energie a přečerpávací vodní elektrárny jsou omezeny počtem vhodných lokalit. Zajímavým řešením akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů je využít přebytečné energie pro elektrolytickou výrobu vodíku, který je možné následně přeměnit na metan. Jak vodík, tak metan lze pak skladovat a využít pro opětovnou výrobu energie. Tato technologie, přeměňující elektrickou energii na plynná paliva se nazývá Power to Gas [33].

5.1 Power to Gas

Jak už bylo zmíněno, Power to Gas je technologie přeměny elektrické energie na plynná paliva, využívána pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů v době jejich špičkové výroby, kdy pro přebytečnou energii není jiného využití. Přebytečná energie je použita pro elektrolytickou výrobu vodíku, ten může být následně použit např. jako palivo pro palivové články, nebo přidán do stávající infrastruktury zemního plynu do výše až 2 % objemového podílu bez vlivu na spalovací vlastnosti plynu [33].

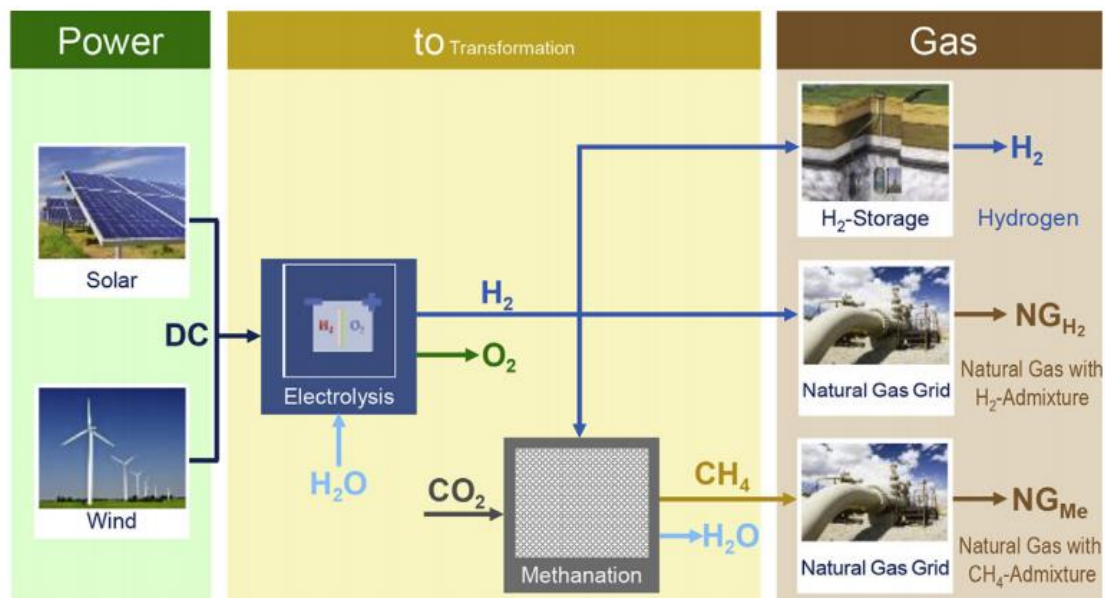
Vyrobený vodík je také možno následně využít pro výrobu metanu. Tento proces se nazývá metanizace, jedná se o sloučení vodíku s oxidem uhličitým probíhající za vysoké teploty a tlaku dle tzv. Sabatierovy reakce (29) [34].



Oproti vodíku je možné metan o dostatečné čistotě přidat do soustavy zemního plynu bez omezení, díky tomu je možné metan mnohem lépe skladovat. Jelikož stávající infrastruktura zemního plynu nabízí obrovskou akumulační kapacitu (např. v Německu 200 000 GWh), představuje výroba vodíku z přebytečné energie a následná metanizace velmi dobrý způsob akumulování energie [33].

Nevýhodou následné metanizace jsou energetické ztráty. Při nejpriznivějších okolnostech se účinnost výroby metanu pohybuje okolo 90 %. Když vezmeme v úvahu, že účinnost výroby vodíku elektrolýzou dosahuje až okolo 80 %, činí celková účinnost výroby metanu okolo 70 %. Tato účinnost je ovšem velmi ovlivněna metodou získávání oxidu uhličitého nezbytného pro metanizaci, využívání vzniklého tepla a dalších okolnostech [33].

Při následné opětovné výrobě elektřiny spalováním metanu dosahuje účinnost okolo 40 %. Pokud vynecháme metanizaci a pro opětovnou výrobu elektřiny použijeme vodík, dosahuje účinnost kolem 45 %. Cenou za akumulaci energie pomocí metody Power to Gas jsou tedy poměrně velké energetické ztráty [33].



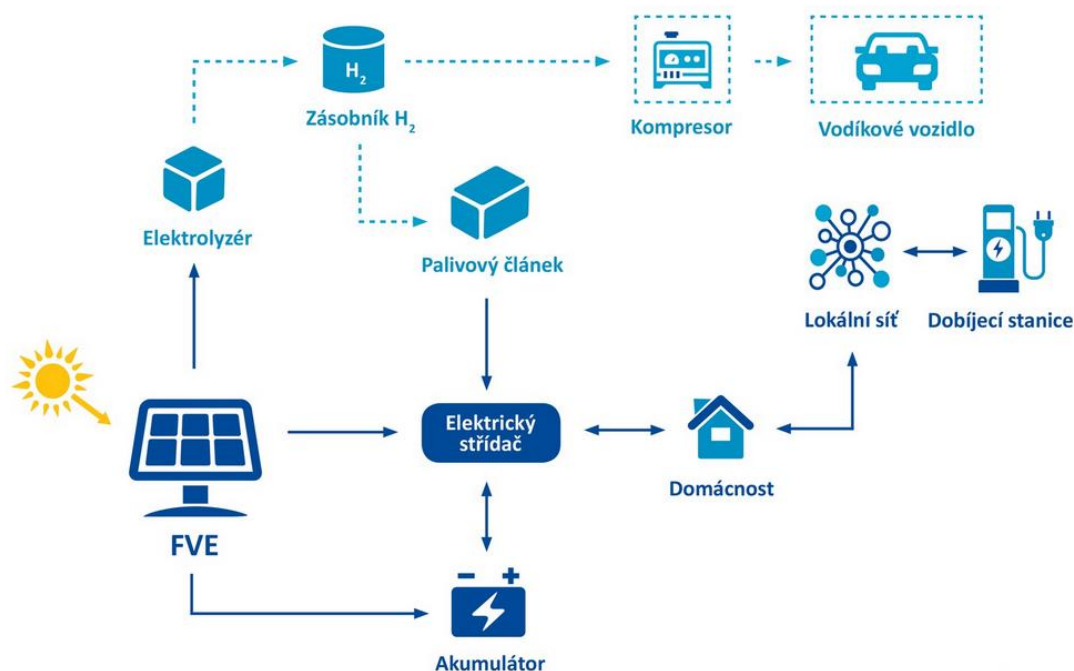
Obr.5.1 Princip technologie Power to Gas [41]

5.2 Příklady projektů Power To Gas

5.2.1 ÚJV Řež – Projekt ukládání přebytků energie

V letech 2009 – 2013 Ústav jaderného výzkumu Řež uskutečnil projekt jehož cílem bylo vyvinout, realizovat a optimalizovat systém pro akumulaci elektrické energie ze zdrojů s proměnlivým výkonem. Jako zdroj energie pro tento systém byly využity fotovoltaické panely běžně používané na střechách rodinných domů, ke kterým byl připojen skladovací systém kombinující olověnou baterii a vodíkovou nádrž. Pilotní zařízení tohoto projektu obsahovalo fotovoltaickou elektrárnu o celkovém výkonu 13,8 kWp, olověný gelový akumulátor o kapacitě 2,2 kWh, elektrolyzátor PEM o max. příkonu 6,7 kW, palivový článek PEM o max. výkonu 4 kW a vodíkovou zásobní nádrž o kapacitě 10 kg vodíku při tlaku 5 – 15 bar. Měření ukázalo, že s plnou vodíkovou nádrží a při plném nabití akumulátoru, je toto zařízení schopno v případě naprosté tmy udržet domácnost v běžném chodu po dobu 14 – 24 dní bez nutnosti napojit se do rozvodné sítě [35].

Akumulační systém tohoto typu nabízí velké množství výhod jako je např. snížení nákladů na primární zdroj energie, flexibilní výroba elektřiny a tepla z vodíku na bázi mikrokogeneračních jednotek a dlouhodobé skladování energie. Tento systém je vhodný např. pro velké střední i malé podniky, které potřebují záložní zdroj energie, nebo pro ty, kteří chtějí podnik provozovat v ostrovním režimu [36].



Obr.5.2 Schéma akumulčního systému ÚJV Řež [36]

5.2.2 Energiepark Mainz

Provoz Energiepark v německém Mainzu byl zahájen začátkem července v roce 2015 a jednalo se o tehdejší největší zařízení pro výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů na světě. Hlavním cílem tohoto projektu je vývoj, testování a aplikace inovativních technologií sloužící k výrobě vodíku elektrolýzou poháněnou energií z obnovitelných zdrojů [37,38].

Energie pro Energiepark Mainz je dodávána z větrných elektráren, dosahující maximálního výkonu 6 MW. Vodík je vyráběn pomocí tří PEM elektrolyzérů. Každý elektrolyzér dosahuje velmi vysokého maximálního výkonu 2 MW. Vodík je dále stlačován pomocí dvoustupňového ionického kompresoru tak, aby mohl být naplněn do skladovacích nádrží, plynovodů a cisternových vozíků [37,40].



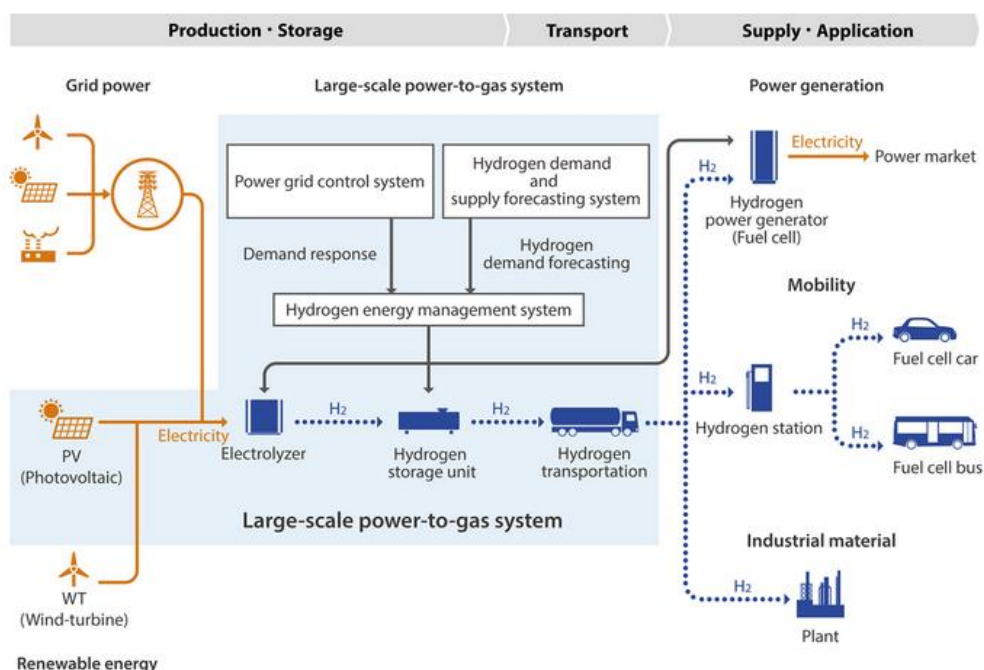
Obr.5.3 Energiepark Mainz [39]

5.2.3 Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R)



Obr.5.4 Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) [43]

Novějším projektem využívající technologii Power to Gas je FH2R. Tato továrna na výrobu čistého vodíku byla dostavěna na konci února roku 2020 v japonském městě Namie. FH2R využívá vlastní solární farmu o instalovaném výkonu 20 MW společně s energií z obnovitelných zdrojů, dodávanou ze sítě na provoz vodíkové výrobní jednotky o výkonu 10 MW využívající k výrobě vodíku elektrolýzu. FH2R dokáže produkovat až 100 kg čistého vodíku za hodinu a jedná se tedy o největší továrnu na výrobu čistého vodíku na světě. Cílem FH2R je maximalizovat využití obnovitelné energie která podléhá velkým výkyvům výkonu a zavést nízkonákladovou technologii výroby vodíku. Vodík je vyráběn a skladován podle předpovědi jeho poptávky a dodávek na trhu. Obr.5.5 znázorňuje schéma výroby, transportu a použití vodíku z FH2R [42,43].



Obr.5.5 Výroba transport a použití vodíku z FH2R [43]

ZÁVĚR

Vodíkové technologie v minulých letech zaznamenali značný pokrok. Vodík je již běžně používán v dopravě, pro výroby elektrické a tepelné energie a při akumulaci energie z obnovitelných zdrojů. Přesto ale tyto technologie mají svá úskalí, která bude potřeba v následujících letech překonat.

Palivočláňkové automobily jsou již schopny vyrovnat se svým dojezdem konvenčním automobilům. Stejně tomu je u palivočláňkových autobusů, které oproti autobusům využívající fosilní paliva neznečišťují vzduch a jsou tedy ideální pro městskou dopravu. Rovněž palivočláňkové vlaky se dokázaly svým dojezdem vyrovnat vlakům dieselovým a představují tak skvělý ekologický způsob dopravy. Hlavní nevýhodou ale pořád zůstává jejich vysoká cena a současně nedostačující vodíková plnicí infrastruktura. V minulých letech však palivové články zaznamenaly veliký pokles ceny, který podle odhadů v následujících letech bude pokračovat. Z tohoto úhlu pohledu se dá říct, že palivočláňková vozidla mají v budoucnosti velký potenciál nahradit vozidla konvenční.

Pokud bude pokles ceny palivových článků opravdu pokračovat, mohly by se jednou mikrokogenerační palivočláňkové jednotky dočkat velkého uplatnění v rodinných domech jako zdroje elektrické energie a tepla. V současnosti je však jejich pořizovací cena příliš velká a hodí se pouze v objektech, kde je následné úspora schopná pokrýt pořizovací náklady.

Technologie Power to Gas se ukázala jako skvělý ekonomický způsob akumulace energie z obnovitelných zdrojů. Jelikož plynná paliva vycházející z tohoto procesu lze snadno skladovat ve stávající infrastruktuře zemního plynu, jsou náklady na skladování oproti jiným technologiím minimální. Díky tomu se těší v současné době tato technologie velké podpory a ve světě hojně roste počet projektů využívající tuhle technologii. Rostoucí počet těchto projektů by mohl v následujících letech také poskytnou potřebnou výrobní kapacitu vodíku pro stále rostoucí počet palivočláňkových vozidel, a také snížit cenu vodíku na hodnotu, která by mohla konkurovat benzínu a naftě. Při přeměně elektrické energie na plynná paliva a zpět však dochází k značným energetickým ztrátám, oproti využití elektrické energie v okamžiku její výroby. Proto by bylo dobré technologii Power to Gas nadále zkoumat a optimalizovat tak, aby byla energie z obnovitelných zdrojů využita co nejefektivněji.

Vodíkové technologie mají tedy již dnes značné uplatnění ve světové energetice. Z počátku velké pořizovací ceny těchto technologií začínají s rostoucí produkcí pozvolna klesat a každým dnem se tak zvyšuje jejich uplatnění. Přesto, že je třeba stále ještě některé problémy související s těmito technologiemi překonat, má vodík i nadále v energetice velký potenciál.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SOMOLOVÁ, Markéta, Petr DLOUHÝ. Výroba vodíku. *Česká vodíková technologická platforma*. [online]. 2007 [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [2] Výroba vodíku parním reformováním. *Petroleum.cz*. [online]. [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [3] HADRAVA, Jan, Roman VOKATÝ, Tomáš HLINČÍK a Daniel TENKRÁT. *Porovnání kvality vodíku z různých technologií výroby* [online]. 2013, 5(3), 79-83 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: paliva.vscht.cz/download.php?id=95
- [4] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-619-2.
- [5] DOUCEK, Aleš, Daniel TENKRÁT a Petr DLOUHÝ. *Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie* [online]. 2011, 3, 1-7 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=36>
- [6] BALAJKA, Jiří. *Vodík a jiné nové nosiče energie*. Bratislava: Alfa, 1982. Edícia energetickej literatúry.
- [7] Separate Hydrogen and Oxygen From Water Through Electrolysis. *Instructables.com* [online]. [cit.2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Separate-Hydrogen-and-Oxygen-from-Water-Through-El/>
- [8] DOUCEK, Aleš. Výroba vodíku z biomasy. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2008 [cit.2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/666-vyroba-vodiku-z-biomasy>
- [9] POHOŘELÝ, Michael. Michal JEREMIÁŠ. Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění. *Biom.cz* [online].2010 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni?add_disc=1
- [10] BIČÁKOVÁ, Olga. *Možnosti výroby vodíku biologickými procesy*. [online]. 2010, roč. 2, č. 4, 103 – 112 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=29>

- [11] SLAVÍK, Jakub. Smart city v praxi: jak pomocí moderních technologií vytvářet město příjemné k životu a přátelské k podnikání. Praha: Profi Press, 2017. ISBN 978-80-86726-80-9.
- [12] BU-210: How does the Fuel Cell Work? *Battery university* [online]. 2011 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/fuel_cell_technology
- [13] PACF. *FuelCellToday* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pafc>
- [14] SOFC. *FuelCellToday* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/sofc>
- [15] MCFC. *FuelCellToday* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/mcfc>
- [16] PEMFC. *FuelCellToday* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>
- [17] DMFC. *FuelCellToday* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/dmfc>
- [18] AFC. *FuelCellToday* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/afc>
- [19] Toyota: *Vodíková technologie* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://pdf.sites.toyota.cz/letak_vodikova_tecnologie.pdf
- [20] PAVLŮSEK, Ondřej. Hyundai ix35 Fuel Cell pro sériovou výrobu. *Auto.cz* [online] 2012 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/hyundai-ix35-fuel-cell-pro-seriovou-vyrobu-70078>
- [21] Užité elektromobily Renault s palivovými články: ucelený balíček služeb pro britské organizace. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/203.php>
- [22] PAVLŮSEK, Ondřej. Toyota spustila výrobu autobusů Sora s palivovými články. *Auto.cz* [online] 2018 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/toyota-spustila-vyrobu-autobusu-sora-s-palivovymi-clanky-121737>
- [23] Palivočlánkové vlaky nahrazují diesely, největší evropský park 27 souprav bude jezdit v okolí Frankfurtu. *Smartcityvpraxi.cz* [online]. 2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_tecnologie_80.php
- [24] SymbioFC/ Renault Kangoo ZE H2. *Hydrogen.no* [online]. 2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.hydrogen.no/kjoretoy/varebiler/symbio-fcell-kangoo-h2>

- [25] Successful year and a half of trial operation of the world's first two hydrogen trains, next project phase begins. *Alstom.com* [online]. 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/5/successful-year-and-half-trial-operation-worlds-first-two-hydrogen>
- [26] Products. *Fuelcellenergy.com* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.fuelcellenergy.com/products/>
- [27] 10 miliónů megawatthodin ze stacionárních palivočlánkových zdrojů od FuelCell Energy. *Smartcityvpraxi.cz* [online]. 2019 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_technologie_80.php
- [28] Mikrokogenerace: řešení pro chytré budovy. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2013 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/inteligentni-budovy/2.php>
- [29] SLAVÍK, Jan. Vodíková mobilita a vodíková energetika – již ne vzdálená budoucnost. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/46.php>
- [30] Vitovalor PT2. *Viessmann.de* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/kraft-waerme-kopplung/mikro-kwk-brennstoffzelle/vitovalor-pt2.html>
- [31] PM UPS Container. *Proton-motor.de* [online]. [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.proton-motor.de/gb/zero-emission-solution/ups-container/>
- [32] Emergency power supply solution for telecommunication towers. *Proton-motor.de* [online]. [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.proton-motor.de/gb/anwendungen/netzersatzanlage-funkmasten-pem-brennstoffzelle/>
- [33] VOBOŘIL, David. Power to Gas - budoucnost akumulace elektřiny? *OEnergetice.cz* [online] 2015 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektriny>
- [34] SCHINDLER, Jan. Zachrání technologie Power to Gas obnovitelné zdroje? *Tzb-info.cz* [online] 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/11034-zachrani-technologie-power-to-gas-obnovitelne-zdroje>
- [35] V Řeži pomáhají urychlit nástup „vodíkové“ ekonomiky. *Proelektrotechniky.cz*. [online]. 2015 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/60.php>
- [36] Vodíkové technologie. *UJV.cz*. [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/nejaderna_energetika/vodikove-technologie

- [37] Energiepark Mainz: největší projekt „power-to-gas“ zahájil provoz. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/69.php>
- [38] PROJECT AIMS. *Energiepark-mainz.de* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.energiepark-mainz.de/en/project/project-aims/>
- [39] PICTURES. *Energiepark-mainz.de* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.energiepark-mainz.de/en/project/pictures/>
- [40] TECHNOLOGY. *Energiepark-mainz.de* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.energiepark-mainz.de/en/technology/technology/>
- [41] SCHIEBAHN, Sebastian, Thomas GRUBE, Martin ROBINIUS, Vanessa TIETZE, Bhunesh KUMAR a Detlef STOLTEN. Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, 2015, 40(12), 4285-4294 [cit. 2020-06-20]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.123. ISSN 0360-3199.
- [42] VOTRUBA, Jan. Japonsko otevřelo ve Fukušimě největší továrnu na čistý vodík na světě. *oEnergetice.cz* [online] 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/japonsko-otevrela-ve-fukusime-nejvetsi-tovarnu-cisty-vodik-svete>
- [43] The world's largest-class hydrogen production, Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) now is completed at Namie town in Fukushima. *Toshiba-energy.com* [online] 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.toshiba-energy.com/en/info/info2020_0307.htm
- [44] Základní informace o vodíku. *Airproducts.cz* [online] [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/Industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-basics.aspx>
- [45] NIKOLAIDIS, Pavlos a Andreas POULLIKKAS. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2017, 67, 597-611 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.044. ISSN 1364-0321.
- [46] MARKOVIČ, Jan. Z kuriozity běžným palivem? Vodík má zlevnit, musí ale překonat technické potíže. *Autobible.euro.cz* [online] 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/z-kuriozity-beznym-palivem-vodik-ma-zlevnit-musi-ale-prekonat-technicke-potize/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
PSI	Fotosystém I
PSII	Fotosystém II
PEMCF	Palivový článek s polymerní membránou
PEM	Polymerní membrána
AFC	Alkalický palivový článek
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou
MCFC	Palivový článek s tekutým uhličitánem
SOFC	Palivový článek s tuhými oxidy
DMFC	Palivový článek pro přímou reakci metanolu
FC-CHP	Palivočláneková kogenerační jednotka
Micro-CHP	Mikrokogenerační jednotka
UPS	Zdroj nepřerušovaného napájení
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
FH2R	Fukushima Hydrogen Energy Research Field

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Schéma parního reformování zemního plynu [2] -----	13
Obr. 1.2 Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů [4]-----	14
Obr. 1.3 Schéma elektrolýzy vody [7] -----	16
Obr. 1.4 Principiální znázornění siřičito-jódového termochemického cyklu [5] -----	18
Obr. 1.5 Princip zplyňování biomasy v sesuvném protiproudém generátoru [9] -----	20
Obr. 1.6 Schéma fotofermentace a prototyp slunečního kolektoru [8] -----	21
Obr.2.1 Princip palivového článku [11] -----	23
Obr.2.2 Princip palivového článku s polymerní membránou [16]-----	24
Obr.2.3 Palivový článek s polymerní membránou [5]-----	24
Obr.2.4 Princip alkalického palivového článku [18] -----	25
Obr.2.5 Princip palivového článku s kyselinou fosforečnou [13]-----	26
Obr.2.6 Princip palivového článku s tekutým uhlíčitanem [15] -----	27
Obr.2.7 Princip palivového článku s tuhými oxidy [14] -----	28
Obr.2.8 Princip palivového článku pro přímou reakci metanolu [17] -----	29
Obr.3.1 Princip fungování elektrického pohonu automobilu s vodíkovými palivovými články [19] -----	31
Obr.3.2 Toyota Mirai [19] -----	32
Obr.3.3 Pohonná soustava Toyoty Mirai [19] -----	32
Obr.3.4 Hyundai ix35 Fuel Cell [20] -----	33
Obr.3.5 Renault kangoo ZE-H2 [24]-----	33
Obr.3.6 Palivo článkový autobus Toyota Sora [19]-----	34
Obr.3.7 Palivočlánkový vlak Coradia iLint [25] -----	35
Obr.4.1 Palivočlánková jednotka SureSource 1500 od FuelCell Energy [26]-----	36
Obr.4.2 Jednoduché schéma jednotky micro-CHP [28]-----	37
Obr.4.3 Vitovalor PT2 [30]-----	38
Obr.4.4 PM UPS od Proton Motor [31] -----	39
Obr.5.1 Princip technologie Power to Gas [41]-----	41
Obr.5.2 Schéma akumulčního systému ÚJV Řež [36]-----	42
Obr.5.3 Energiepark Mainz [39] -----	43
Obr.5.4 Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) [43] -----	44
Obr.5.5 Výroba transport a použití vodíku z FH2R [43]-----	44

SEZNAM TABULEK

Tab č.1 Ekonomické porovnání vybraných metod výroby vodíku [45] ----- 22

Tab č.2 Výhody a omezení jednotlivých typů palivových článků [12] ----- 30